



**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**PEMODELAN DAN PERANCANGAN PENGENDALI  
ONLINE DYNAMIC SET-POINT WEIGHTING PID  
UNTUK REMOTE CONTROL WEAPON STATION  
(RCWS) 12,7 MM**

**BILL FEBRIAN WINOTO**  
**NRP 2113 100 064**

**Dosen Pembimbing**  
**Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng., Ph.D.**  
**Hendro Nurhadi, Dipl. Ing., Ph.D.**

**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**



**TUGAS AKHIR - TM 141585**

**PEMODELAN DAN PERANCANGAN PENGENDALI  
ONLINE DYNAMIC SET-POINT WEIGHTING PID  
UNTUK REMOTE CONTROL WEAPON STATION  
(RCWS) 12,7 MM**

**BILL FEBRIAN WINOTO**  
**NRP 2113 100 064**

**Dosen Pembimbing**  
Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng., Ph.D.  
Hendro Nurhadi, Dipl. Ing., Ph.D.

**JURUSAN TEKNIK MESIN**  
**Fakultas Teknologi Industri**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**



**FINAL PROJECT - TM 141585**

**Modelling and Design of Online Dynamic Set-point Weighting Method PID Controller for Remote Control Weapon Station (RCWS) 12,7 MM**

**BILL FEBRIAN WINOTO**  
**NRP 2113 100 064**

**Advisor**

**Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng., Ph.D.**  
**Hendro Nurhadi, Dipl. Ing., Ph.D.**

**MECHANICAL ENGINEERING DEPARTMENT**  
**FACULTY OF INDUSTRIAL ENGINEERING**  
**Institut Teknologi Sepuluh Nopember**  
**Surabaya 2017**

**PEMODELAN DAN PERANCANGAN PENGENDALI  
ONLINE DYNAMIC SET-POINT WEIGHTING PID  
UNTUK REMOTE CONTROL WEAPON STATION  
(RCWS) 12,7 MM**

**TUGAS AKHIR**

Diajukan Untuk Memenuhi Salah Satu Syarat  
Memperoleh Gelar Sarjana Teknik  
pada  
Program Studi S-1 Departemen Teknik Mesin  
Fakultas Teknologi Industri  
Institut Teknologi Sepuluh Nopember

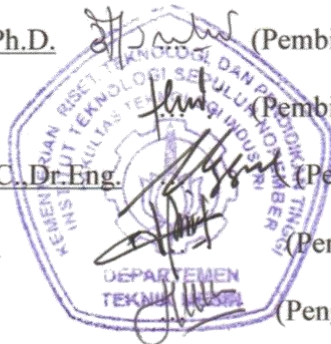
Oleh :

**BILL FEBRIAN WINOTO**

NRP. 2113 100 064

Disetujui oleh Tim Penguji Tugas Akhir :

1. Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng. Ph.D. (Pembimbing)  
NIP. 196912031994031001
2. Hendro Nurhadi, Dipl. Ing., Ph.D. (Pembimbing)  
NIP. 197511202002121002
3. Unggul Wasiwitono, ST., M.Eng.SC., Dr.Eng. (Penguji I)  
NIP. 197805102001121001
4. Latifah Nurahmi, ST., M.Sc., Ph.D. (Penguji II)  
NIP.
5. Ari Kurniawan Saputra S.T., M.T. (Penguji III)  
NIP. 198512022014042002



**SURABAYA**

**JULI, 2017**



# **Pemodelan dan Perancangan Pengendali *Online Dynamic Set-point Weighting* PID untuk Remote Control Weapon Station (RCWS) 12,7 mm**

**Nama** : Bill Febrian Winoto  
**NRP** : 2113 100 064  
**Jurusan** : Teknik Mesin, FTI  
**Pembimbing** : Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng, PhD  
Hendro Nurhadi, Dipl. Ing., Ph.D.

## **ABSTRAK**

*Sebuah negara tidak akan mampu mempertahankan kemerdekaan tanpa menjaga kedaulatan didalam wilayahnya. Salah satu upaya mencapai kedaulatan adalah melalui angkatan bersenjata untuk menjaga wilayah dan keselamatan rakyatnya dari berbagai ancaman, baik dalam maupun luar negeri. Tentara Republik Indonesia (TNI) merupakan angkatan bersenjata Republik Indonesia (RI). TNI berfungsi sebagai penangkal setiap ancaman militer dan bersenjata dan pemulihan kondisi keamanan negara yang terganggu akibat kekacauan keamanan. TNI tentu memerlukan persenjataan terbaik untuk menjalankan tugasnya. Remote Controlled Weapon Station (RCWS) merupakan salah satu bentuk peralatan modern yang bertujuan menunjang kinerja angkatan bersenjata.*

*Penelitian ini membuat model kinematik dari sistem diperoleh dengan menggunakan metode inverse kinematics. Parameter DH dapat digunakan untuk menentukan parameter desain yang diperlukan dalam penentuan model kinematik. Pemodelan kinematik akan menghasilkan model kinematik dan matriks Jacobian. Persamaan gerak yang diperoleh diolah menjadi model dinamik dengan formulasi Lagrangian dan direpresentasikan dengan state space. Model dari sistem kemudian dikendalikan dengan pengendali PID dan Online Dynamics Set Point Weigthing PID (ODSPW-PID). Performa keduanya*

*dibandingkan untuk menentukan pengendali yang lebih unggul untuk aplikasi pada sistem RCWS. Pengendali harus memiliki settling time kurang dari 2 sekon, overshoot kurang dari 20 persen, dan root mean square error kurang dari 0,01 radian (0,573 derajat).*

*Hasil keluaran dari simulasi kedua pengendali adalah grafik respon. Grafik tersebut akan dianalisa untuk mengetahui performa dari pengendali. Pengendali ODSPW PID memiliki settling time lebih kecil dibanding pengendali PID, dengan selisih 50,23% untuk gerakan azimuth dan 57,56% untuk gerakan elevasi. Pengendali ODSPW PID memiliki overshoot lebih rendah dibandingkan pengendali PID, dengan 86,78% lebih rendah untuk gerakan azimuth dan 69,80% lebih rendah untuk gerakan elevasi. Pengendali PID memiliki root mean square error lebih rendah 29,15% dibanding pengendali ODSPW PID untuk gerakan azimuth dan 22,82% lebih rendah untuk gerakan elevasi.*

*Hasil pengujian keterkendalian dan keteramatan membuktikan bahwa model dari sistem yang diperoleh dapat diamati dan dikendalikan.*

***Kata kunci: RCWS, Manipulator, Inverse Kinematics, Formulasi Lagrangian, State Space, Analisis Regresi, optimasi GRG, Online Dynamics Set Point Weigthing PID, Lie Bracket, Lie Derivative, Sistem Non-linier***

**Modelling and Design of Online Dynamic Set-point Weighting  
Method PID Controller for Remote Control Weapon Station  
(RCWS) 12,7 mm**

**Name : Bill Febrian Winoto**  
**NRP : 2113 100 064**  
**Departement : Teknik Mesin, FTI**  
**Advisor : Ir. Bambang Pramujati, MSc.Eng, PhD**  
**Hendro Nurhadi, Dipl. Ing., Ph.D.**

**ABSTRACT**

A nation would not be able to protect its independence without defending its sovereignty. One way to defend it is through armed forces, to protect a nation existence and its people from many threats, both domestic and foreign threats. Tentara Republik Indonesia (TNI) is one of Indonesia armed forces. TNI function as a repellent from every military and armed threat and to restore the nation's condition which is distorted caused by security chaos. TNI needs for the best available weaponry to do its tasks. Remote Controlled Weapon Station (RCWS) is a modern combat weaponry which should be able to support TNI operations.

This research will build a model of the system through inverse kinematics method. DH parameter will be used to represent design parameter used for kinematic modelling. Kinematic modelling will generate a kinematic model and Jacobian matrices. The equation of motion will be processed to become dynamic model with Lagrangian formulae. Then, it will be represented with state space. The obtained system model will be controlled using PID controller and Online Dynamics Set-point Weighting PID (ODSPW-PID). The performance of both controllers will be compared to determine which one is more suitable for the application. The controller should have settling time less than 2 seconds, percentage overshoot less than 20%, and root mean square error less than 0,01 radians (0,573 degree).



The outcome of the controller simulation is response graph. The graph will be analyzed to know the performance of the controllers. ODSPW PID controller have smaller settling time compared to PID controller, 50,23% faster for azimuth movement and 57,56% faster for elevation movement. ODSPW PID controller have an advantage in percentage overshoot, in which its percentage is 86,78% lower than PID controller for azimuth movement and 69,80 % lower than PID controller for elevation movement. PID controller has 29,15% lower root mean square error for azimuth movement compared to ODSPW controller and 22,82% lower root mean square error for elevation movement compared to ODSPW controller.

The result of controllability and observability test prove that the model of the system is controllable and observable.

**Keywords: RCSW, Manipulator, Inverse Kinematics, Lagrangian Formula, State Space, Regression Analysis, GRG Optimization, Online Dynamics Set-point Weighting PID, Lie Bracket, Lie Derivative, Non-linear System**

## KATA PENGANTAR

Segala puji dan syukur kepada Tuhan atas penyertaan-Nya sehingga penulis dapat menyelesaikan tugas akhir dengan judul “Pemodelan dan Perancangan Pengendali Online Dynamic Set-point Weighting PID untuk Remote Control Weapon Station (RCWS) 12,7 mm.”

Tugas akhir ini disusun sebagai salah satu persyaratan untuk memperoleh gelas sarjana pada Jurusan Teknik Mesin, Fakultas Teknologi Industri – ITS. Penulis banyak mendapat bantuan dan bimbingan dari berbagai pihak dalam menyelesaikan tugas akhir ini. Penulis ingin menyampaikan ucapan terima kasih kepada:

1. Kedua orangtua penulis yang telah mendukung dan mendoakan selama penyelesaian tugas akhir ini.
2. Kedua saudara saya atas dukungan selama penyelesaian tugas akhir ini.
3. Bapak Ir. Bambang Pramujati, M.Sc.Eng., Ph.D. selaku ketua jurusan Teknik Mesin FTI ITS dan dosen pembimbing yang selalu memberikan masukan dan arahan selama penyelesaian tugas akhir ini.
4. Bapak Hendro Nurhadi, Dipl. Ing., Ph.D. selaku dosen pembimbing yang selalu memberikan arahan, bimbingan, dan dukungan selama penyelesaian tugas akhir ini.
5. Bapak Unggul Wasiwitono, ST., M. Eng.SC., Dr. Eng., Ibu Latifah Nurahmi, ST., M.Sc., Ph.D., dan Bapak Ari Kurniawan Saputra, S.T., M.T. selaku dosen penguji yang telah memberikan saran dan kritik membangun sehingga tugas akhir ini dapat terselesaikan dengan sempurna.

6. Ibu Vivien Suphandhani, ST, M.E, Ph.D, selaku dosen wali yang telah memberikan bimbingan dan dukungan selama masa perkuliahan.
7. Seluruh dosen pengajar Jurusan Teknik Mesin yang telah memberikan banyak ilmu dan pengetahuan selama perkuliahan penulis.
8. Semua teman-teman Teknik Mesin angkatan 2013 atas dukungan dan bantuannya selama masa perkuliahan.
9. Dan semua pihak yang tidak dapat disebutkan satu persatu.

Penulis berharap agar tugas akhir ini dapat bermanfaat bagi pembaca. Penulis juga menyadari bahwa tugas akhir ini masih memiliki kekurangan. Penulis berharap saran dan kritik dari pembaca untuk pengembangan pada tahapan selanjutnya.

Surabaya, 28 Juli 2017

Penulis

## DAFTAR ISI

|   |             |
|---|-------------|
| <b>HALAMAN JUDUL.....</b>                             | <b>iv</b>   |
| <b>LEMBAR PENGESAHAN.....</b>                         | <b>vi</b>   |
| <b>ABSTRAK.....</b>                                   | <b>iv</b>   |
| <b>KATA PENGANTAR .....</b>                           | <b>viii</b> |
| <b>DAFTAR ISI.....</b>                                | <b>x</b>    |
| <b>DAFTAR GAMBAR .....</b>                            | <b>xiv</b>  |
| <b>DAFTAR TABEL.....</b>                              | <b>xvi</b>  |
| <b>BAB I PENDAHULUAN .....</b>                        | <b>1</b>    |
| 1.1    Latar Belakang .....                           | 1           |
| 1.2    Rumusan Masalah .....                          | 2           |
| 1.3    Batasan Masalah.....                           | 2           |
| 1.4    Tujuan Penelitian.....                         | 3           |
| 1.5    Manfaat Penelitian.....                        | 3           |
| <b>BAB II TINJAUAN PUSTAKA .....</b>                  | <b>5</b>    |
| 2.1 Tinjauan Pustaka .....                            | 5           |
| 2.1.1 Pemodelan Sistem .....                          | 5           |
| 2.1.2 Pengendali ODSPW PID .....                      | 7           |
| 2.2 Pemodelan Kinematik .....                         | 11          |
| 2.2.1 Matriks Transformasi Homogen Denavit-Hartenberg | 12          |
| 2.2.2 <i>Direct Kinematics</i> .....                  | 15          |
| 2.2.3 <i>Inverse Kinematics</i> .....                 | 15          |
| 2.2.4 Matriks Jacobian.....                           | 16          |
| 2.3 Pemodelan Dinamik .....                           | 17          |
| 2.3.1 Matriks Inersia Lengan.....                     | 18          |
| 2.3.2 Formulasi Lagrangian.....                       | 18          |
| 2.4 <i>State Space</i> .....                          | 20          |
| 2.5 Keterkendalian dan Keteramatan Sistem.....        | 21          |
| 2.6 Pengendali PID.....                               | 23          |
| 2.7 Rancangan Percobaan <i>Response Surface</i> ..... | 24          |
| 2.8 Analisis Regresi.....                             | 25          |
| 2.9 Optimasi GRG Non-linier .....                     | 26          |
| 2.10 Parameter Perfoma Pengendali .....               | 27          |
| <b>BAB III METODOLOGI .....</b>                       | <b>29</b>   |

|   |           |
|---|-----------|
| 3.1 <i>Flowchart</i> Penelitian .....                                 | 29        |
| 3.2 Kajian Metode .....   | 30        |
| 3.3 Metode Penelitian .....   | 30        |
| 3.4 Spesifikasi dan Kriteria Desain dari RCWS 12.7 mm.....            | 33        |
| 3.4.1 Spesifikasi Alat.....   | 33        |
| 3.4.2 Kriteria Desain Pengendali.....                                 | 35        |
| 3.5 <i>Flowchart</i> pemodelan kinematik.....                         | 36        |
| 3.6 <i>Flowchart</i> pemodelan dinamik.....                           | 37        |
| 3.7 <i>Flowchart</i> Perancangan Pengendali .....                     | 38        |
| 3.8 Simulasi pada Matlab dan Simulink.....                            | 39        |
| <b>BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN.....</b>                               | <b>41</b> |
| 4.1 Hasil Pemodelan Kinematik .....                                   | 41        |
| 4.2 Hasil Pemodelan Dinamik.....                                      | 42        |
| 4.3 Hasil <i>State Space</i> .....                                    | 42        |
| 4.4 Hasil Analisis Keterkendalian dan Keteramatan dari Sistem .....   | 43        |
| 4.5 Model Simulink.....   | 44        |
| 4.6 Hasil Regresi dan Optimasi Parameter Pengendali .....             | 47        |
| 4.7 Analisis Respon Pengendali PID.....                               | 51        |
| 4.7 Analisis Respon Pengendali ODSPW PID.....                         | 52        |
| 4.8 Perbandingan Respon Pengendali PID dan ODSPW .....                | 54        |
| <b>BAB V KESIMPULAN DAN SARAN .....</b>                               | <b>57</b> |
| 5.1 Kesimpulan.....   | 57        |
| 5.2 Saran.....  | 58        |
| <b>DAFTAR PUSTAKA .....</b>   | <b>59</b> |
| <b>LAMPIRAN A .....</b>   | <b>63</b> |
| A.1 <i>Block Diagram Plant</i> .....                                  | 63        |
| <b>LAMPIRAN B .....</b>   | <b>67</b> |
| B.1 Analisis Regresi Gerakan Azimut untuk Pengendali PID .....        | 67        |
| B.2 Analisis Regresi Gerakan Elevasi untuk pengendali PID.....        | 71        |
| B.3 Analisis Regresi Gerakan Azimut untuk Pengendali ODSPW PID .....  | 75        |
| B.4 Analisis Regresi Gerakan Elevasi untuk pengendali ODSPW PID ..... | 79        |
| B.5 Optimasi GRG Non-linier.....                                      | 83        |

|   |           |
|---|-----------|
| <b>LAMPIRAN C .....</b>   | <b>85</b> |
| C.1 Kode untuk Model Kinematik, Model Dinamik, dan <i>State Space</i> ..... | 85        |
| C.2 Kode untuk Keterkendalian dan Keteramatan Sistem .....                  | 90        |
| C.3 Kode untuk Fungsi Lie Bracket .....                                     | 91        |
| C.4 Kode untuk Pengujian Kestabilan Lyapunov .....                          | 92        |
| <b>LAMPIRAN D .....</b>   | <b>95</b> |

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## DAFTAR GAMBAR

|  |    |
|--|----|
| Gambar 2.1 Grafik hubungan $\beta$ dengan $a$ dan $\Delta e$<br>(Mitra, 2014) .....                        | 10 |
| Gambar 2.2 Perbandingan respon ODSPW, FSPW,<br>dan ZN-PID (Mitra, 2014) .....                              | 10 |
| Gambar 2.3 Definisi sumbu dan parameter DH (Tsai, 1999) ...  | 12 |
| Gambar 2.4 Skema <i>block diagram</i> untuk pengendali PID .....   | 24 |
| Gambar 3.1 <i>Flowchart</i> penelitian .....   | 29 |
| Gambar 3.2 Parameter $a_2$ pada lengan 2 (Wahyudi, 2016) .....   | 34 |
| Gambar 3.3 Parameter $a_1$ pada lengan 1 (Wahyudi, 2016) .....   | 34 |
| Gambar 3.4 Parameter $d_1$ pada lengan 1 (Wahyudi, 2016) .....   | 34 |
| Gambar 3.5 <i>Flowchart</i> pemodelan kinematik .....  | 36 |
| Gambar 3.6 <i>Flowchart</i> pemodelan dinamik .....  | 37 |
| Gambar 3.7 <i>Flowchart</i> perancangan pengendali .....   | 38 |
| Gambar 3.8 Skema <i>block diagram</i> untuk pengendali<br>ODSPW PID .....                                  | 39 |
| Gambar 3.9 <i>Block diagram</i> untuk pengendali ODSPW-PID ...   | 39 |
| Gambar 4.1 <i>Block diagram</i> dari <i>plant</i> .....  | 44 |
| Gambar 4.2 <i>Block diagram</i> pengendali PID .....   | 45 |
| Gambar 4.3 Sub-sistem pengendali ODSPW PID .....   | 46 |
| Gambar 4.4 <i>Block diagram</i> pengendali ODSPW PID .....   | 46 |
| Gambar 4.5 Grafik respon gerakan azimut untuk pengendali<br>PID .....                                      | 51 |
| Gambar 4.6 Grafik respon gerakan elevasi untuk pengendali<br>PID .....                                     | 51 |
| Gambar 4.7 Grafik respon gerakan azimut untuk pengendali<br>ODSPW PID dan PID .....                        | 53 |
| Gambar 4.8 Grafik respon gerakan elevasi untuk pengendali<br>ODSPW PID dan PID .....                       | 53 |
| Gambar 4.9 Grafik perbandingan respon optimal untuk gerakan<br>azimut pengendali PID dan ODSPW PID .....   | 55 |
| Gambar 4.10 Grafik perbandingan respon optimal untuk gerakan<br>elevasi pengendali PID dan ODSPW PID ..... | 55 |
| Gambar A.1 <i>Block diagram</i> bagian A (1) .....   | 63 |



|  |    |
|--|----|
| Gambar A.2 <i>Block diagram</i> bagian A (2) .....   | 64 |
| Gambar A.3 <i>Block diagram</i> bagian A (3) .....   | 64 |
| Gambar A.4 <i>Block diagram</i> bagian B .....   | 65 |
| Gambar B.1 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap<br><i>settling time</i> pengendali PID .....                  | 68 |
| Gambar B.2 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap<br>persen <i>overshoot</i> pengendali PID .....               | 69 |
| Gambar B.3 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap<br>RMSE pengendali PID .....                                  | 70 |
| Gambar B.4 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap<br><i>settling time</i> pengendali PID .....                  | 72 |
| Gambar B.5 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap<br>persen <i>overshoot</i> pengendali PID .....               | 73 |
| Gambar B.6 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap<br>RMSE pengendali PID .....                                  | 74 |
| Gambar B.7 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap<br><i>settling time</i> pengendali ODSPW PID .....            | 76 |
| Gambar B.8 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap<br>persen <i>overshoot</i> pengendali ODSPW PID .....         | 77 |
| Gambar B.9 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap<br>RMSE pengendali ODSPW PID .....                            | 78 |
| Gambar B.10 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap<br><i>settling time</i> pengendali ODSPW PID .....           | 80 |
| Gambar B.11 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap<br>persen <i>overshoot</i> pengendali ODSPW PID .....        | 81 |
| Gambar B.12 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap<br>RMSE pengendali ODSPW PID .....                           | 82 |
| Gambar B.13 Susunan Excel .....  | 83 |
| Gambar B.14 Parameter <i>Solver</i> GRG Non-linier .....   | 84 |
| Gambar D.1 Spesifikasi motor Rexroth MAD100B<br>( <a href="http://www.boschrexroth.com">www.boschrexroth.com</a> ) ..... | 95 |

## DAFTAR TABEL

|   |    |
|---|----|
| Tabel 2.1 Parameter DH untuk manipulator serial 3 DOF<br>(Tsai, 1999) .....                       | 13 |
| Tabel 2.2 Rancangan eksperimen <i>response surface</i><br>(Montgomery, 2012) .....                | 25 |
| Tabel 3.1 Parameter desain dari RCWS .....  | 35 |
| Tabel 3.2 Kriteria Desain Pengendali .....  | 35 |
| Tabel 4.1 Batasan nilai parameter $K_p$ , $K_i$ , dan $K_d$ untuk<br>gerakan azimuth .....        | 47 |
| Tabel 4.2 Batasan nilai parameter $K_p$ , $K_i$ , dan $K_d$ untuk<br>gerakan elevasi .....        | 47 |
| Tabel 4.3 Nilai $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ optimal untuk pengendali PID<br>gerakan azimuth .....       | 50 |
| Tabel 4.4 Nilai $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ optimal untuk pengendali PID<br>gerakan elevasi .....       | 50 |
| Tabel 4.5 Nilai $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ optimal untuk pengendali<br>ODSPW PID gerakan azimuth ..... | 50 |
| Tabel 4.6 Nilai $K_p$ , $K_i$ , $K_d$ optimal untuk pengendali<br>ODSPW PID gerakan elevasi ..... | 51 |
| Tabel 4.7 Performa optimal pengendali PID untuk<br>gerakan azimuth .....                          | 52 |
| Tabel 4.8 Performa optimal pengendali PID untuk<br>gerakan elevasi .....                          | 52 |
| Tabel 4.9 Performa optimal pengendali ODSPW PID untuk<br>gerakan azimuth .....                    | 54 |
| Tabel 4.10 Performa optimal pengendali ODSPW PID<br>untuk gerakan elevasi .....                   | 54 |
| Tabel 4.11 Performa pengendali PID untuk<br>gerakan azimuth .....                                 | 54 |
| Tabel 4.12 Performa pengendali PID untuk<br>gerakan elevasi .....                                 | 54 |
| Tabel B.1 Hasil pengambilan data untuk gerakan azimuth<br>pengendali PID .....                    | 67 |

|  |    |
|--|----|
| Tabel B.2 Hasil pengambilan data untuk gerakan elevasi<br>pengendali PID .....       | 71 |
| Tabel B.3 Hasil pengambilan data untuk gerakan azimuth<br>pengendali ODSPW PID ..... | 75 |
| Tabel B.4 Hasil pengambilan data untuk gerakan elevasi<br>pengendali ODSPW PID ..... | 79 |



# **BAB I**

## **PENDAHULUAN**

### **1.1 Latar Belakang**

Sebuah negara tidak akan mampu mempertahankan kemerdekaan tanpa menjaga kedaulatan didalam wilayahnya. Selain itu, negara juga harus menjaga wibawanya untuk menjaga kekuasaan negara dan hukum negara. Salah satu upaya mencapai kedaulatan adalah melalui angkatan bersenjata untuk menjaga eksistensi wilayah dan menjaga keselamatan rakyatnya dari berbagai ancaman, baik dalam maupun luar negeri. Angkatan bersenjata harus mampu membangun kemampuan dan daya tangkal pertahanan yang kuat (Supriyatno, 2014). Oleh karena itu, suatu negara memerlukan angkatan bersenjata yang kuat agar dapat mempertahankan kemerdekaannya.

Tentara Republik Indonesia (TNI) merupakan angkatan bersenjata Republik Indonesia (RI). TNI berfungsi sebagai penangkal setiap ancaman militer dan bersenjata, baik dari luar atau dalam negeri, dan pemulih kondisi keamanan negara yang terganggu akibat kekacauan keamanan (PUSPEN TNI, 2012). Walaupun perannya sangat penting, TNI tidak dilengkapi dengan persenjataan terbaik. Banyak ditemukan alat yang telah berumur dan sudah seharusnya tidak digunakan. Pemerintah saat ini menyadari hal tersebut dan berencana untuk melakukan pembaharuan peralatan untuk menunjang kinerja dari TNI (Sawitri, 2015).

*Remote Controlled Weapon Station* (RCWS) merupakan salah satu bentuk peralatan modern yang bertujuan menunjang kinerja angkatan bersenjata. RCWS dapat dipasang diatas panzer, seperti panzer Anoa milik PT. Pindad. Dengan menggunakan RCWS, penembak tidak perlu berada diatas kendaraan untuk menggunakan senjata. Senjata dapat diatur

gerakannya dari tempat yang aman. Dengan demikian, penembak tidak terancam keselamatannya. Selain itu, RCWS juga dilengkapi dengan berbagai peralatan dan sensor canggih. RCWS mampu mengukur jarak dari target, sehingga dapat menembak dengan tepat.

Mendesain suatu sistem RCWS memerlukan berbagai perhitungan sebelumnya. Selain perhitungan kinematik dan dinamik, sebuah metode kontrol yang mampu bereaksi dengan cepat dan tepat diperlukan untuk menunjang hal tersebut. Salah satu metode kontrol yang sesuai dengan karakteristik yang diinginkan adalah sistem pengendali PID. Aktuator akan dikontrol oleh sistem pengendali PID agar dapat bergerak mencapai target dengan cepat dan tepat. Selain itu, *Online Dynamic Set Point Weighting* (ODSPW) PID mampu menghasilkan respon yang baik. Penelitian lebih lanjut diperlukan untuk membuat suatu sistem pengendali PID dan ODSPW PID yang sesuai dengan RCWS.

## **1.2 Rumusan Masalah**

Berdasarkan latar belakang yang telah diuraikan diatas, penelitian ini akan membahas beberapa permasalahan, yaitu:

1. Bagaimana model kinematik dari sistem RCWS kaliber 12,7mm.
2. Bagaimana model dinamik dari sistem RCWS kaliber 12,7mm.
3. Bagaimana rancangan pengendali PID dan ODSPW PID untuk sistem RCWS kaliber 12,7mm.
4. Bagaimana hasil simulasi sistem RCWS kaliber 12,7mm dengan sistem pengendali PID dan ODSPW PID.

## **1.3 Batasan Masalah**

Beberapa batasan masalah dan asumsi yang ada dalam penelitian ini meliputi:

1. Analisa didasarkan pada desain bentuk RCWS 12.7 mm dari ITS.
2. Senjata yang digunakan adalah M2 Browning 12.7 mm.
3. Material yang digunakan untuk RCWS adalah aluminium.
4. Target dan RCWS diasumsikan dalam keadaan diam.
5. Pengendalian gerak RCWS berdasarkan masukan posisi yang diperoleh dari sistem instrumentasi sensor.
6. Gerakan yang dikendalikan adalah gerakan azimut dan elevasi.
7. Gaya dorong (*recoil*) sebagai gangguan akibat penembakan diabaikan.
8. Gesekan dan *losses* pada sistem mekanik diabaikan.

#### **1.4 Tujuan Penelitian**

Tujuan dari penelitian ini adalah:

1. Mengetahui model kinematik dari sistem RCWS kaliber 12.7 mm.
2. Mengetahui model dinamik dari sistem RCWS kaliber 12.7 mm.
3. Merancang pengendali PID dan ODSPW PID untuk sistem RCWS kaliber 12.7 mm.
4. Mensimulasikan sistem RCWS kaliber 12.7 mm dengan sistem pengendali PID dan ODSPW PID.

#### **1.5 Manfaat Penelitian**

Manfaat dari penelitian ini adalah:

1. Diperoleh pengetahuan untuk sistem kendali PID dan ODSPW PID pada sistem RCWS kaliber 12.7 mm.
2. Dapat dijadikan bahan pertimbangan dalam pengembangan sistem kendali untuk RCWS kaliber 12.7 mm.

3. Dapat dijadikan referensi dalam perancangan sistem pengendali PID dan ODSPW PID untuk berbagai aplikasi lainnya.



## **BAB II**

### **TINJAUAN PUSTAKA**

#### **2.1 Tinjauan Pustaka**

*Remote controlled weapon station* (RCWS) merupakan perkembangan terbaru dari sistem robotik pada aplikasi militer. RCWS dapat dimanfaatkan untuk sistem pertahanan dengan diletakkan di perbatasan suatu negara, maupun untuk meningkatkan kemampuan dari kendaraan tempur seperti panser (Alston, 2012). Keuntungan utama dari penggunaan RCWS adalah operator yang dapat mengendalikan sistem dari jarak jauh. Dengan demikian, keamanan dari operator tidak terancam. Selain itu, berbagai teknologi terbaru juga diaplikasikan pada RCWS. Sistem *image processing* yang telah terpasang memungkinkan target dicapai dengan akurat dan presisi, bahkan pada cuaca ekstrim (Delta, 2015). Penguasaan teknologi RCWS tentunya sangat berguna bagi sistem pertahanan suatu negara.

Pengembangan sistem RCWS dimulai dari perancangan desain sistem tersebut. Salah satu rancangan sistem RCWS yang sedang dikembangkan adalah RCWS dari ITS (Wahyudi, 2016). Sistem RCWS yang dirancang terdiri atas 2 bagian utama, yaitu *cradle* dan rangka. Gerakan yang mampu dilakukan sistem adalah gerakan azimut dan elevasi. Desain tersebut akan menjadi dasar dalam pemodelan sistem RCWS. Setelah desain diperoleh, maka dapat dicari parameter desain yang diperlukan. Dengan demikian, model dinamik dan kinematik dari sistem dapat diperoleh.

##### **2.1.1 Pemodelan Sistem**

Pemodelan kinematik bertujuan untuk memperoleh persamaan posisi, kecepatan, dan turunan variabel posisi terhadap waktu (Tsai, 1999). Suatu sistem RCWS dapat

didekati sebagai suatu sistem manipulator robot untuk memperoleh model kinematikanya. Meskipun sistem dapat bergerak secara spasial (3D), namun sistem terdiri atas dua buah *revolute joint*. Dengan demikian, sistem memiliki 2 *degree of freedom* (DOF) (Walchko, 2010). Model kinematik dari sistem dapat diperoleh dengan menggunakan parameter DH berdasarkan parameter dari desain yang telah diperoleh, hingga akhirnya diperoleh matriks Jacobian yang menerangkan hubungan antara sudut motor dengan lokasi *end-effector* (Gu, 1992).

Pemodelan dinamik berhubungan dengan gaya atau torsi yang diperlukan untuk melakukan suatu gerakan. Oleh karena itu, massa dan inersia memiliki peranan besar (Siciliano, 2009). Terdapat beberapa metode untuk memperoleh model dinamik dari suatu sistem. Pertama, dengan menggunakan metode Newton-Euler (Munadi, 2007). Metode ini mendeskripsikan sistem berdasarkan gaya dan momentum. Kedua, dengan menggunakan metode Lagrangian (Gu, 1992) (Gomes, 2005) (Robles, 2012). Metode ini mendeskripsikan sistem berdasarkan kerja dan energi. Maka, gaya yang tidak menghasilkan gaya tidak ditampilkan dalam persamaan. Metode ini lebih mudah digunakan dan sistematis daripada metode Newton-Euler. Selain itu, persamaan yang diperoleh juga lebih ringkas (Asada, 1986).

Model dinamik yang telah diperoleh dari persamaan Lagrangian merupakan sistem non-linier orde dua dengan dua *input* dan satu *output*. Oleh karena itu, sistem harus dilinierkan terlebih dahulu. Hal ini dapat dilakukan dengan menggunakan *Taylor series* (Ogata, 2010). Persamaan yang telah dilinierkan kemudian diubah menjadi bentuk *state space*, yang akan merepresentasikan model dalam bentuk lebih sederhana. Selain itu, penggunaan *state space* juga akan membantu saat penentuan karakteristik dari sistem (Mushonnifah, 2016). Sistem yang telah diperoleh kemudian diuji karakteristiknya, yaitu sifat

keterkendalian dan keteramatan (Ogata, 2010). Apabila sistem dapat memenuhi kedua karakteristik tersebut, maka dapat dirancang sistem pengendali yang tepat.

### 2.1.2 Pengendali ODSPW PID

Kontrol posisi untuk suatu sistem RCWS harus mampu bereaksi dengan cepat dan akurat. PID merupakan salah satu pengendali yang umum diaplikasikan. Kemudahan dalam penggunaan, *robustness*, dan kemampuan untuk mencapai performa mendekati optimal menyebabkannya sangat populer. Sekitar 90% pengendali yang digunakan di dunia menggunakan pengendali PID (Astrom, 2001). Meskipun demikian, metode PID memerlukan pengaturan yang tepat agar memberikan hasil yang terbaik. Terdapat beberapa metode yang dapat digunakan, seperti *pole placement*, pengaturan kappa-tau, dan *D-partitioning*. Meskipun demikian, metode yang paling umum digunakan adalah metode Ziegler-Nichols (Cominos, 2002).

Metode Ziegler-Nichols (ZN) menggunakan nilai dari *ultimate gain* dan periode osilasi untuk menentukan nilai dari  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Metode ini merupakan metode *heuristic*, dimana nilai yang diperoleh tidak akan optimal namun cukup untuk aplikasi (Ziegler, 1942). Metode ini coba diperbaiki dengan menggunakan *set-point weighting* ( $\beta$ ), disebut metode *Refined Ziegler-Nichols* (RZN) (Hang, 1991). Nilai dari  $\beta$  dipengaruhi oleh *gain* ternormalisasi ( $k$ ) dan *dead-time* ternormalisasi ( $\theta$ ). Keduanya dapat dituliskan sesuai persamaan 2.1 dan 2.2.

$$\theta = \frac{\theta_a}{T_p} \quad (2.1)$$

$$k = 2 \left( \frac{11\theta + 13}{37\theta - 4} \right) \quad (2.2)$$

Penelitian menunjukan bahwa nilai  $\beta$  pada kondisi  $2.25 < k < 15$  dan  $0.16 < \theta < 0.57$  dapat dirumuskan sebagai:

$$\beta = \frac{15 - k}{15 + 5} ; \%OS = 10\% \quad (2.3)$$

Sementara, untuk nilai  $1.5 < k < 2.25$  dan  $0.57 < \theta < 0.96$  dapat dituliskan sebagai:

$$\beta = \frac{8}{17} \left( \frac{4}{9}k + 1 \right) \quad (2.4)$$

Metode RZN, walaupun memberikan hasil yang lebih baik, masih memiliki ruang untuk diperbaiki. Metode RZN memiliki nilai  $\beta$  yang konstan, sehingga diperlukan pengaturan setiap periode waktu tertentu. Diajukan suatu nilai  $\beta$  yang dapat berubah sesuai kondisi sistem. Metode ini disebut metode *variable set-point weighting* (VSW) (Hang, 1996). Nilai dari  $\beta$  berubah ketika sistem mengalami perubahan dan nilai dari  $\theta$  berubah. Nilai dari  $\theta$  dapat diperoleh melalui persamaan 2.5.

$$\theta = \frac{\pi - 2 \arctan(\sqrt{K_u K_p - 1})}{2.72 \sqrt{K_u K_p - 1}} + 0.10 \quad (2.5)$$

Berdasarkan hasil percobaan eksperimen, maka nilai dari  $\beta$  dapat dituliskan sebagai persamaan 2.6.

$$\beta = 0.4\theta^2 - 0.05\theta + 0.58 \quad (2.6)$$

Walaupun nilai dari  $\beta$  disebut dapat beradaptasi, namun sepanjang suatu proses nilainya tetap konstan karena nilai  $\theta$  tidak berubah. Peneliti menyimpulkan bahwa metode ini menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan metode ZN.

Pengembangan terbaru dari metode VSW adalah metode *dynamic set point weighting* (DSW), dimana nilai dari  $\beta$  akan berubah-ubah sepanjang proses (Dey, 2006). Selain menggunakan nilai dari  $\theta$  sebagai fungsi  $\beta$ , nilai dari *error* sebelumnya ( $\Delta e$ ) juga akan mempengaruhi. Oleh karena nilai dari  $\Delta e$  akan berubah-ubah sepanjang proses, maka nilai  $\beta$  juga akan mengikuti. Nilai dari  $\beta$  dapat diperoleh dari persamaan 2.7.

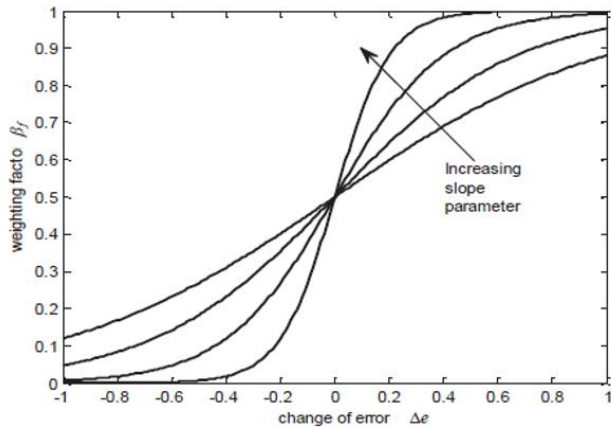
$$\beta = K_1 \theta \Delta e \quad (2.7)$$

Dimana  $K_1$  adalah suatu konstanta tambahan yang dapat diatur agar diperoleh nilai yang diinginkan. Peneliti memperoleh nilai 10 untuk sistem yang diteliti berdasarkan data simulasi. Akan tetapi, nilai untuk  $K_1$  dapat diatur sesuai dengan sistem yang akan dikendalikan. Peneliti menyimpulkan bahwa metode ini menghasilkan respon yang lebih baik dibandingkan PID konvensional dan VSW-PID. Akan tetapi, terdapat variabel tambahan,  $K_1$ , yang harus ditentukan berdasarkan pengujian.

Penambahan variabel  $K_1$  berusaha dihilangkan dengan menggunakan metode *online dynamic set point weighting* (ODSPW) (Mitra, 2014). Pada metode tersebut, nilai dari *set-point weighting* ( $\beta$ ) akan berubah-ubah sesuai dengan kemiringan (*slope*) dari respon sistem. Dengan demikian, respon transien dari sistem akan semakin baik dan memperbaiki *robustness* sistem. Pada penelitian yang dilakukan, digunakan suatu fungsi sigmoid untuk mendefinisikan nilai dari  $\beta$ . Persamaan tersebut dapat dilihat pada persamaan 2.8.

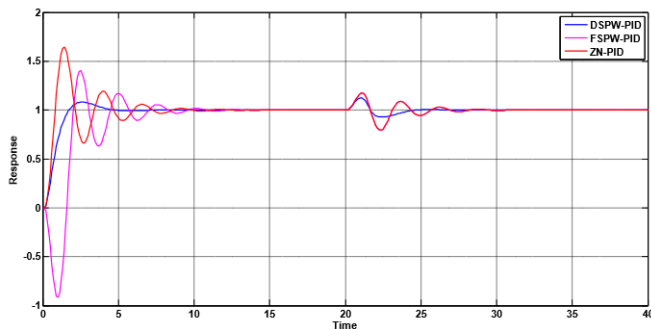
$$\beta(\Delta e) = \frac{1}{1 + e^{-(a \times \Delta e)}} \quad (2.8)$$

Berdasarkan persamaan diatas, nilai dari  $\beta$  merupakan suatu fungsi dari *slope* ( $a$ ). Sementara, nilai dari  $a$  sangat bergantung nilai perubahan *error* ( $\Delta e$ ). Hubungan dari keduanya dapat dilihat pada gambar 2.1.



Gambar 2.1 Grafik hubungan  $\beta$  dengan  $\alpha$  dan  $\Delta e$  (Mitra, 2014)

Dengan demikian, nilai dari komponen P pada PID akan terus disesuaikan oleh nilai  $\beta$  untuk mengurangi terjadinya osilasi. Simulasi pada penelitian yang telah dilakukan menunjukkan bahwa respon dari sistem dengan metode *online dynamic set point weighting* lebih baik daripada sistem dengan metode RZN maupun sistem tanpa *set point weighting*. Hal ini dapat dilihat pada gambar 2.2.



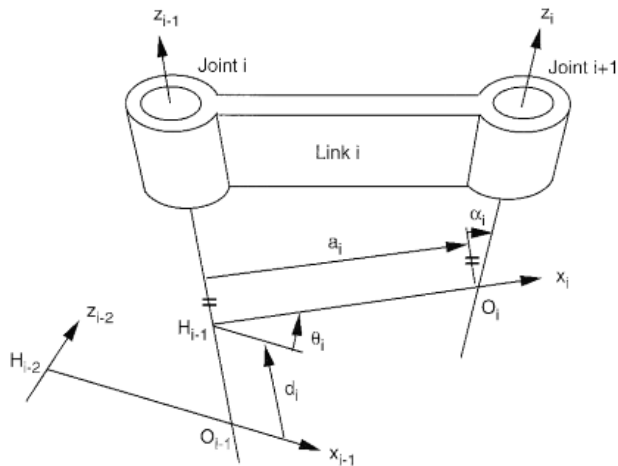
Gambar 2.2 Perbandingan respon ODSPW, FSPW, dan ZN-PID (Mitra, 2014)

Peneliti menyimpulkan bahwa metode ini lebih baik dibandingkan metode yang telah ada sebelumnya. Selain itu, penggunaan *online dynamic set point weighting* mampu meningkatkan *robustness* dari sistem. Penggunaan metode ini sangat dianjurkan karena sederhana dan mudah untuk diimplementasikan. Selain itu, metode ini juga dapat digunakan untuk sistem non-linear.

## 2.2 Pemodelan Kinematik

Pemodelan kinematik berhubungan dengan posisi, kecepatan, dan turunan lainnya dari variabel posisi terhadap waktu. Variabel dari *joint* (sendi) pada suatu manipulator berhubungan erat dengan posisi dan orientasi dari *end effector* (penggerak akhir), sesuai dengan batasan dari masing-masing *joint*. Terdapat dua jenis analisa kinematik, yaitu *forward kinematics* dan *inverse kinematics*. *Forward kinematics* bertujuan untuk mencari posisi dan orientasi dari *end effector* ketika sudut dari *joint* diketahui. Sementara, *inverse kinematics* bertujuan untuk mencari sudut dari *joint* ketika posisi dan orientasi dari *end effector* telah diketahui. (Tsai, 1999)

Pada suatu analisa pemodelan kinematik, ada beberapa hal yang harus ditentukan terlebih dahulu. Pertama, harus ditentukan *link* (lengan), *joint* (sendi), dan *end effector* dari sistem. Selain itu, tiap-tiap *joint* harus ditentukan koordinat lokalnya. Sumbu Z searah dengan arah dari *joint*. Sumbu X positif didefinisikan sepanjang *common normal* antara *joint i* dan *joint i-1* dari arah titik *i* ke *i-1*. Sementara, sumbu Y mengikuti aturan tangan kanan.



Gambar 2.3 Definisi sumbu dan parameter DH (Tsai, 1999)

### 2.2.1 Matriks Transformasi Homogen Denavit-Hartenberg

Sistem yang telah didefinisikan dapat digunakan untuk memperoleh parameter matrix transformasi. Parameter tersebut mengikuti konvensi Denavit dan Hartenberg pada tahun 1995, sehingga disebut *D-H Parameters*. Ada 4 parameter yang harus diketahui untuk masing-masing *joint*, yaitu:

- $a_i$ : selisih jarak antara dua axis *joint* yang berdekatan. Selisih tersebut umumnya dapat dilihat dari jarak antara sumbu  $z_{i-1}$  ke  $z_i$ .
- $d_i$ : jarak translasi antara dua garis normal axis yang berpotongan. Jarak tersebut dapat didefinisikan sebagai jarak antara sumbu  $x_{i-1}$  ke  $x_i$ .
- $\alpha_i$ : sudut putar antara dua axis *joint* yang berdekatan. Sudut tersebut adalah sudut yang diperlukan untuk memutar axis  $z_{i-1}$  menuju  $z_i$  pada sumbu  $x_i$  positif sesuai aturan tangan kanan.



- $\theta_i$ : sudut *joint* antara dua garis normal axis yang berpotongan. Sudut tersebut adalah sudut yang diperlukan untuk memutar axis  $x_{i-1}$  menuju  $x_i$  pada sumbu  $z_{i-1}$  positif sesuai aturan tangan kanan.

Pada sebuah *revolute joint*, nilai dari  $a_i$ ,  $d_i$ , dan  $\alpha_i$  adalah konstan. Sementara, nilai  $\theta_i$  merupakan suatu variabel. Pada sebuah *prismatic joint*, nilai dari  $a_i$ ,  $\theta_i$ , dan  $\alpha_i$  adalah konstan. Sementara, nilai dari  $d_i$  merupakan suatu variabel. Keempat parameter yang telah ditentukan dapat dimasukkan dalam sebuah tabel seperti tabel 2.1.

Tabel 2.1 Parameter DH untuk manipulator serial 3 DOF (Tsai, 1999)

| Joint i | $\alpha_i$ | $a_i$ | $d_i$ | $\theta_i$ |
|---------|------------|-------|-------|------------|
| 1       | 0          | $a_1$ | 0     | $\theta_1$ |
| 2       | 0          | $a_2$ | 0     | $\theta_2$ |
| 3       | 0          | $a_3$ | 0     | $\theta_3$ |

Parameter-parameter tersebut dapat digunakan untuk mengetahui transformasi posisi dan orientasi dari *joint* i ke i-1. Untuk itu, keempat parameter untuk masing-masing *joint* dijadikan bentuk matrix sebagai berikut:

$$T(z, d) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.9)$$

$$T(z, \theta) = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i) & 0 & 0 \\ \sin(\theta_i) & \cos(\theta_i) & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.10)$$

$$T(x, a) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & a_i \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.11)$$

$$T(x, \alpha) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \cos(\alpha_i) & -\sin(\alpha_i) & 0 \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.12)$$

Keempat matrix diatas merupakan empat transformasi dasar pada perubahan koordinat axis. Matrix transformasi dapat diperoleh dengan menggabungkan persamaan 2.11 hingga 2.14 sesuai dengan persamaan:

$${}^{i-1}A_i = T(z, d)T(z, \theta)T(x, a)T(x, \alpha) \quad (2.13)$$

Sehingga, diperoleh matrix transformasi untuk suatu *joint* i:

$${}^{i-1}A_i = \begin{bmatrix} \cos(\theta_i) & -\sin(\theta_i)\cos(\alpha_i) & \sin(\alpha_i)\sin(\theta_i) & a_i\cos(\theta_i) \\ \sin(\theta_i) & \cos(\alpha_i)\cos(\theta_i) & -\sin(\alpha_i)\cos(\theta_i) & a_i\sin(\theta_i) \\ 0 & \sin(\alpha_i) & \cos(\alpha_i) & d_i \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Umumnya, suatu sistem terdiri atas beberapa *joint* sejumlah n. Matrix transformasi dari suatu sistem dapat diketahui melalui persamaan:

$${}^0A_n = \prod_{n=1}^n {}^{n-1}A_n \quad (2.15)$$

Selain itu, perlu diketahui bahwa suatu matrix transformasi terdiri atas matrix rotasi (R), matrix posisi (q), matrix transformasi perspektif ( $\gamma$ ), dan faktor skala ( $\rho$ ). Hal ini dapat dituliskan sebagai:

$${}^A A_B = \begin{bmatrix} {}^A R_B (3 \times 3) & \vdots & \gamma (1 \times 3) \\ \dots & \vdots & \dots \\ {}^A q (3 \times 1) & \vdots & \rho (1 \times 1) \end{bmatrix} \quad (2.16)$$

### 2.2.2 Direct Kinematics

*Direct Kinematics* bertujuan untuk memperoleh vektor posisi (q) dari *end effector* ketika sudut dari *joint* telah diketahui. Untuk *joint* sejumlah n, vektor q dapat diketahui melalui persamaan:

$$\begin{bmatrix} q_x \\ q_y \\ q_z \\ 1 \end{bmatrix} = {}^0 A_n \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.17)$$

### 2.2.3 Inverse Kinematics

*Inverse Kinematics* bertujuan untuk mengetahui sudut dari masing-masing *joint* ketika lokasi dari *end effector* telah diketahui. Selain menentukan matrix transformasi dari sistem, perlu ditentukan pula matrix transformasi dari *end effector*. Untuk sebuah manipulator *planar* dengan 3 *degree of freedom* (DOF), matrix *end effector* berupa:

$${}^0 A_3 = \begin{bmatrix} \cos(\phi) & -\sin(\phi) & 0 & q_x \\ \sin(\phi) & \cos(\phi) & 0 & q_y \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

Dimana  $\phi$  merupakan orientasi dari *end effector*,  $q_x$  merupakan lokasi *end effector* terhadap sumbu x dan  $q_y$  merupakan lokasi *end effector* terhadap sumbu y.

Matrix dari *end effector* dapat dibandingkan dengan matrix transformasi yang telah diperoleh sebelumnya. Dengan membandingkan kedua matrix dalam sebuah persamaan, maka dapat diperoleh nilai dari masing-masing sudut *joint*.

### 2.2.4 Matriks Jacobian

Analisa posisi dengan menggunakan *direct kinematics* maupun *inverse kinematics* memungkinkan untuk mengetahui lokasi dari *end effector* dan sudut *joint*. Pada beberapa aplikasi seperti pengecatan cat mobil, analisa kecepatan juga ingin dilakukan untuk mengetahui hubungan antara kecepatan sudut dari *joint* dengan kecepatan dari *end effector*.

Matriks Jacobian adalah suatu matriks yang mengubah kecepatan sudut pada aktuator menjadi kecepatan pada *end effector*. Terdapat dua metode dari matriks Jacobian, yaitu *conventional Jacobian* dan *screw-based Jacobian*. Secara matematis, matriks Jacobian dapat ditulis menjadi:

$$\dot{x} = J \dot{q} \quad (2.19)$$

Dimana  $\dot{x}$  adalah vektor kecepatan dari *end effector* yang berdimensi m dan  $\dot{q}$  adalah kecepatan dari aktuator yang berdimensi n. Dengan demikian, matriks Jacobian berdimensi m x n.

Lokasi dan orientasi dari masing-masing aksis *joint* harus diketahui terlebih dahulu sebelum menghitung matriks Jacobian. Orientasi dari aksis *joint* dapat diketahui melalui:

$$z_{i-1} = {}^0R_{i-1} \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

Sementara, untuk lokasi dari suatu *joint*  $i$  dapat diketahui melalui:

$${}^{i-1}p_n = {}^0R_{i-1} {}^{i-1}r_i + {}^ip_n \quad (2.21)$$

Dimana,

$${}^{i-1}r_i = \begin{bmatrix} a_i \cos(\theta_i) \\ a_i \sin(\theta_i) \\ d_i \end{bmatrix} \quad (2.22)$$

Pada *conventional Jacobian*, dapat digunakan titik mana pun sebagai referensi. Namun, umumnya digunakan titik awal (*origin*). Matriks Jacobian dibagi menjadi dua bagian untuk mempermudah perhitungan, yaitu  $J_{vi}$  dan  $J_{wi}$ .  $J_{vi}$  disebut *link jacobian matrix* dan  $J_{wi}$  disebut *link jacobian submatrices*. Matriks Jacobian dapat disusun sesuai dengan persamaan:

$$J_i = \begin{bmatrix} J_{vi} \\ J_{wi} \end{bmatrix} \quad (2.23)$$

$$J_{vi} = \begin{cases} z_{j-1} \times {}^{j-1}P_i & \text{untuk joint revolute} \\ z_{j-1} & \text{untuk joint prismatic} \end{cases} \quad (2.24)$$

$$J_{wi} = \begin{cases} z_{j-1} & \text{untuk joint revolute} \\ 0 & \text{untuk joint prismatic} \end{cases} \quad (2.25)$$

### 2.3 Pemodelan Dinamik

Pemodelan dinamik berhubungan dengan gaya atau torsi yang diperlukan untuk melakukan suatu gerakan pada suatu sistem. Gaya atau torsi dari suatu sistem sangat dipengaruhi oleh jalur gerakan (*path of motion*), massa, beban, dan gaya luar dari sistem. Sejumlah gaya atau torsi yang diperlukan harus diberikan pada *joint* agar sistem dapat bergerak sesuai yang diinginkan. (Tsai, 1999)

### 2.3.1 Matriks Inersia Lengan

Inersia adalah resistansi dari suatu benda untuk mengubah kondisi kecepatannya. Inersia sangat berpengaruh dalam pemodelan dinamik. Inersia menentukan apakah suatu benda mudah untuk berubah keadaan kecepatannya. Inertia suatu benda untuk tiap arah kecepatan dapat berbeda satu dengan yang lain. Pada suatu benda tiga dimensi, inertia dapat dituliskan dalam sebuah matriks sebagai berikut:

$$I = \begin{bmatrix} I_{xx} & I_{xy} & I_{xz} \\ I_{yx} & I_{yy} & I_{yz} \\ I_{zx} & I_{zy} & I_{zz} \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

Apabila suatu *link* terdiri atas beberapa komponen, inersia dari masing-masing komponen dapat dihitung masing-masing terlebih dahulu. Kemudian, inersia dari *link* dapat dihitung berdasarkan inersia masing-masing komponen. Selain itu, inersia dari suatu *link* dapat dilihat dengan menggambarinya pada aplikasi *Solidworks*. Pada aplikasi tersebut, tersedia layanan untuk memeriksa inersia dari sistem untuk masing-masing arah kecepatan. Inersia dari suatu sistem dapat dilihat melalui fitur *mass properties*.

### 2.3.2 Formulasi Lagrangian

Metode Lagrangian merupakan salah satu metode untuk mencari persamaan gerak dari suatu manipulator. Berbeda dengan metode Newton-Euler, metode lagrangian menggunakan koordinat umum (*generalized coordinate*). Dengan demikian, batasan-batasan gaya dapat dihilangkan. Fungsi Lagrangian didefinisikan sebagai perbedaan antara energi kinetik dan energi potensial dari suatu sistem mekanis.

$$L = K - U \quad (2.27)$$

Perlu diingat bahwa energi kinetik bergantung pada lokasi dan kecepatan dari *link*, sementara energi potensial bergantung pada lokasi dari *link*. Persamaan Lagrange dapat dituliskan sebagai:

$$\frac{d}{dt} \left( \frac{\partial L}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L}{\partial q_i} = Q_i, i = 1, 2, \dots, n \quad (2.28)$$

Dengan memasukan energi kinetik dan energi dinamik dalam persamaan 2.28, maka dapat diperoleh bentuk umum dari persamaan dinamik sebagai berikut:

$$M\ddot{q} + V + G = Q \quad (2.29)$$

Dimana,  $M$  adalah matriks inersia dari manipulator,  $V$  adalah kecepatan kopel,  $G$  adalah vector gravitasi dan  $Q$  adalah vector gaya.

Matriks inersia dari suatu manipulator dengan *link*-n dapat diketahui setelah matriks inersia untuk masing-masing *link* telah diketahui. Selain itu, diperlukan pula nilai dari matriks Jacobian. Apabila semua hal yang dibutuhkan telah dihitung, maka dapat diperoleh:

$$M = \sum_{i=1}^n (J_{vi}^T m_i J_{vi} + J_{\omega i}^T I_i J_{\omega i}) \quad (2.30)$$

Vektor kecepatan kopel terdiri atas dua tipe. Pertama, kecepatan kopel yang berhubungan dengan gaya sentrifugal. Kedua, kecepatan kopel yang berhubungan dengan gaya koriolis. Vektor kecepatan kopel dapat dituliskan:

$$V_i = \sum_{j=1}^n \sum_{k=1}^n \left( \frac{\partial M_{ij}}{\partial q_k} - \frac{1}{2} \frac{\partial M_{jk}}{\partial q_i} \right) \dot{q}_j \dot{q}_k \quad (2.31)$$

Vektor gaya gravitasi menjelaskan gaya akibat gaya gravitasi pada *link*. Hal ini dipengaruhi oleh massa dari *link* dan matriks Jacobian. Hal ini dapat ditulis menjadi:

$$G_i = - \sum_{j=1}^n m_j g^T J_{vj}^i \quad (2.32)$$

## 2.4 State Space

*State space* merupakan salah satu metode untuk merepresentasikan model matematis dari suatu sistem. Metode ini mudah diaplikasikan untuk sistem kompleks dengan banyak *input* dan banyak *output*. Secara umum, *state space* dapat dituliskan menjadi:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx + Du \end{aligned} \quad (2.33)$$

Dimana **A** adalah matriks sistem, **B** adalah matriks *input*, **C** adalah matriks *output*, dan **D** adalah matriks *feedforward*. Selain itu,  $x$  adalah *state vector*,  $\dot{x}$  adalah turunan dari  $x$ ,  $y$  adalah vector *output*, dan  $u$  adalah vector *input*. (Nise, 2011)

Suatu sistem dapat dimasukan kedalam bentuk *state space* dengan menggunakan matriks Jacobian (Mushonnifah, 2016). Secara umum, matriks Jacobian dapat ditulis sesuai persamaan 2.34.

$$J(\bar{x}) = \begin{pmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \frac{\partial f_1}{\partial x_2} & \frac{\partial f_1}{\partial x_3} & \frac{\partial f_1}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_2}{\partial x_1} & \frac{\partial f_2}{\partial x_2} & \frac{\partial f_2}{\partial x_3} & \frac{\partial f_2}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_3}{\partial x_1} & \frac{\partial f_3}{\partial x_2} & \frac{\partial f_3}{\partial x_3} & \frac{\partial f_3}{\partial x_4} \\ \frac{\partial f_4}{\partial x_1} & \frac{\partial f_4}{\partial x_2} & \frac{\partial f_4}{\partial x_3} & \frac{\partial f_4}{\partial x_4} \end{pmatrix} \quad (2.34)$$



## 2.5 Keterkendalian dan Keteramatan Sistem

Suatu sistem yang akan dikendalikan harus diuji terlebih dahulu sifat-sifatnya. Terdapat dua sifat yang perlu diuji, yaitu keterkendalian (*controllability*) dan keteramatan (*observability*). Ketika sistem tidak dapat memenuhi kedua sifat tersebut, maka sistem tersebut tidak stabil. Sehingga, ketika ada gangguan (*disturbance*), sistem akan bergerak menuju tak hingga (Friedland, 2005).

Suatu sistem dinyatakan terkendali pada suatu waktu  $t_0$  apabila dimungkinkan memindahkan sistem dari kondisi awal apapun  $x(t_0)$  menuju ke keadaan lain pada interval waktu tertentu. Sementara, suatu sistem dinyatakan teramatasi pada suatu waktu  $t_0$  dengan keadaan  $x(t_0)$  apabila dimungkinkan untuk menentukan keadaan dari pengamat *output* pada interval waktu tertentu (Ogata, 2010).

Sistem dinyatakan terkontrol dengan mengevaluasi nilai dari matrik keterkendalian. Matriks keterkendalian untuk sistem non-linier dapat disusun dengan menggunakan *lie brackets*. Secara umum, *lie brackets* dapat dituliskan sesuai persamaan 2.35 hingga 2.37. (Hedrick, 2015)

$$[f, g] = \frac{\partial g}{\partial x}f - \frac{\partial f}{\partial x}g \quad (2.35)$$

$$(ad_f^1, g) = [f, g] \quad (2.36)$$

$$(ad_f^k, g) = [f, (ad_f^{k-1}, g)] \quad (2.37)$$

Matriks keterkendalian untuk sistem dengan *state space* nonlinier dengan bentuk sesuai persamaan 2.38 dapat dituliskan sesuai dengan persamaan 2.39.

$$\dot{x} = f(x) + g_1 u_1 + g_2 u_2 \quad (2.38)$$

$$C = [g_1, g_2, [f, g_1], [f, g_2]] \quad (2.39)$$

Syarat untuk keterkendalian adalah:

1. Matriks keterkendalian tidak berupa singular.
2. Rank dari matriks keterkendalian berharga  $n$ , sesuai dengan ukuran matriks **A** dari *state space*.

Sistem dinyatakan teramati dengan mengevaluasi nilai dari matrik keteramatan. Matriks keteramatan untuk sistem non-linier dapat disusun dengan menggunakan *lie derivative*. Secara umum, *lie derivative* dapat dituliskan sesuai persamaan 2.40 dan 2.41. (Hedrick, 2015)

$$L_f h = \frac{\partial h}{\partial x} \dot{x} \quad (2.40)$$

$$h^{(k)} = L_f^k(h) \quad (2.41)$$

Matriks keteramatan dapat didefinisikan sesuai persamaan 2.42 dan 2.43. Nilai dari  $n$  bergantung pada jumlah *state*.

$$G = \begin{bmatrix} L_f^0(h_1) & \cdots & L_f^0(h_p) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ L_f^{n-1}(h_1) & \cdots & L_f^{n-1}(h_p) \end{bmatrix} \quad (2.42)$$

$$dG = \begin{bmatrix} dL_f^0(h_1) & \cdots & dL_f^0(h_p) \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ dL_f^{n-1}(h_1) & \cdots & dL_f^{n-1}(h_p) \end{bmatrix} \quad (2.43)$$

Syarat untuk keterkendalian adalah:

1. Matriks keterkendalian memiliki  $n$  kolom yang independen.
2. Rank dari matriks keterkendalian berharga  $n$ , sesuai dengan ukuran matriks **A** dari *state space*.

## 2.6 Pengendali PID

PID merupakan suatu pengendali yang umum digunakan dalam dunia industri. PID bekerja dengan mengkalkulasi nilai selisih (*error*) antara *setpoint* yang diinginkan dengan kenyataan. PID kemudian berusaha mengaplikasikan perbaikan berdasarkan *proportional* (P), *integral* (I), dan *derivative* (D). Perbaikan diaplikasikan dengan mengatur besaran dari variabel kontrol dari sistem. Dengan demikian, nilai yang diinginkan dapat dicapai sesuai dengan kondisi yang diinginkan (Nise, 2011).

Bagian P (*proportional*) pada pengendali menghasilkan suatu *output* pengendali yang proporsional dengan nilai *error*. Hal ini dapat dilihat dari persamaan:

$$P_{out} = K_p e(t) \quad (2.44)$$

Bagian I (*integral*) berpengaruh pada besaran dan durasi dari nilai *error*. Bagian I merupakan penjumlahan dari nilai *error* selama waktu tertentu, sehingga dapat diketahui nilai *error* yang harus diperbaiki. Nilai dari *error* yang telah terakumulasi kemudian dikalikan dengan  $K_i$  dan ditambahkan pada *output* pengendali. Hal ini dapat dilihat dari persamaan:

$$I_{out} = K_i \int_0^t e(t) dt \quad (2.45)$$

Bagian D (*derivative*) berpengaruh terhadap *settling time* (waktu untuk menuju keadaan stabil) dan stabilitas dari sistem. Hal ini dicapai dengan menentukan kemiringan dari *error* pada sepanjang waktu tertentu dan mengalikannya dengan nilai  $K_d$ . Hal ini dapat dilihat dari persamaan:

$$D_{out} = K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.46)$$

Dari ketiga persamaan 2.44 hingga 2.46, maka dapat diperoleh rumusan matematis untuk pengendali PID sebagai berikut:

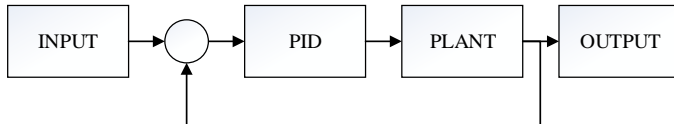
$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt + K_d \frac{de(t)}{dt} \quad (2.47)$$

$$e(t) = y_r - y \quad (2.48)$$

Dimana  $y_r$  adalah nilai dari *set point* dan  $e(t)$  adalah *error*. PID dapat dimasukkan dalam Simulink untuk pemodelan. Untuk itu, PID dilambangkan oleh suatu *transfer function*, yaitu:

$$G_c(s) = K_1 + \frac{K_2}{s} + K_3 s \quad (2.49)$$

Selain itu, nilai dari masing-masing  $K$  (*gain*) juga dapat dituliskan secara langsung dengan *block* PID pada Simulink. Hal ini dapat dilakukan sesuai dengan gambar 2.4.



Gambar 2.4 Skema *block diagram* untuk pengendali PID

## 2.7 Rancangan Percobaan *Response Surface*

Suatu rancangan percobaan diperlukan untuk melakukan analisis regresi dan optimasi. Hal ini diperlukan agar pengambilan data dapat dilakukan secara sistematis. Salah satu rancangan percobaan yang umum digunakan adalah *response surface*. Metode ini memungkinkan pengambilan data sesedikit mungkin, namun dapat digunakan untuk membentuk suatu model orde dua (kuadratik) dengan regresi. Bentuk rancangan eksperimen *response surface coded* untuk 3 variabel secara

umum dapat dilihat pada tabel 2.2. Angka 1 menunjukkan nilai maksimum, angka -1 menunjukkan nilai minimum, angka 0 menunjukkan titik tengah. Angka 1.682 dan -1.682 menunjukkan titik aksial. Y merupakan respon dari sistem. (Montgomery, 2012)

Tabel 2.2 Rancangan eksperimen *response surface* (Montgomery, 2012)

| No. | A      | B      | C      | Y   |
|-----|--------|--------|--------|-----|
| 1   | -1     | -1     | -1     | Y1  |
| 2   | 1      | -1     | -1     | Y2  |
| 3   | -1     | 1      | -1     | Y3  |
| 4   | 1      | 1      | -1     | Y4  |
| 5   | -1     | -1     | 1      | Y5  |
| 6   | 1      | -1     | 1      | Y6  |
| 7   | -1     | 1      | 1      | Y7  |
| 8   | 1      | 1      | 1      | Y8  |
| 9   | -1,682 | 0      | 0      | Y9  |
| 10  | 1,682  | 0      | 0      | Y10 |
| 11  | 0      | -1,682 | 0      | Y11 |
| 12  | 0      | 1,682  | 0      | Y12 |
| 13  | 0      | 0      | -1,682 | Y13 |
| 14  | 0      | 0      | 1,682  | Y14 |
| 15  | 0      | 0      | 0      | Y15 |
| 16  | 0      | 0      | 0      | Y16 |
| 17  | 0      | 0      | 0      | Y17 |

## 2.8 Analisis Regresi

Analisis regresi bertujuan untuk memperoleh model matematis berdasarkan data yang dimiliki. Perlakuan yang tepat bagi proses dapat ditentukan berdasarkan model matematis yang telah diperoleh. Beberapa perangkat lunak dapat

digunakan untuk membantu proses analisis tersebut, seperti Microsoft Excel dan Minitab. Akan tetapi, Minitab memiliki superioritas dalam pengolahan data statistik. Persamaan hasil analisis regresi untuk model orde dua (kuadratik) dapat ditulis sebagai: (Montgomery, 2012)

$$\hat{Y} = \beta_0 + \sum_{i=1}^k \beta_i x_i + \sum_{i=1}^k \beta_{ii} x_i^2 + \sum_{i=1}^k \sum_{j=1}^k \beta_{ij} x_i x_j + \epsilon \quad (2.50)$$

## 2.9 Optimasi GRG Non-linier

*Generalized Reduced Gradient* (GRG) merupakan salah satu algoritma optimasi untuk persamaan non-linier (Lasdon, 1975). GRG dapat digunakan untuk mengoptimalkan suatu persamaan non-linier yang berkelanjutan (*continuous*). GRG memiliki satu fungsi tujuan dan beberapa fungsi batasan (*constrain*). Fungsi tujuan yang digunakan dapat berupa meminimalkan, memaksimalkan, ataupun mencapai suatu nilai tertentu. Fungsi batasan bertujuan untuk menentukan daerah dimana nilai tujuan dapat dicapai.

GRG telah berkembang dan dapat ditemukan pada *solver* Microsoft Excel (Harmon, 2011). Persamaan yang diperoleh dari regresi mula-mula dimasukkan pada Microsoft Excel. Batasan-batasan yang digunakan, seperti nilai maksimum ataupun nilai minimum dari suatu variabel, dapat dimasukkan pula pada Microsoft Excel. Setelah semua data telah diberikan, dapat ditentukan fungsi tujuan dan batasan pada *solver*. Selain itu, perlu juga ditentukan tujuan dari optimasi yang dilakukan, seperti meminimalkan atau memaksimalkan suatu nilai. Metode GRG kemudian dipilih. *Solver* Microsoft Excel akan memberitahu apabila ditemukan suatu nilai yang optimal. Nilai tersebut optimal hanya untuk *range* yang telah ditentukan.

## 2.10 Parameter Perfoma Pengendali

Terdapat beberapa parameter performa yang akan digunakan untuk mengevaluasi kemampuan dari pengendali. Parameter pertama adalah *settling time*, yaitu waktu yang dibutuhkan respon *step* untuk mencapai dan berada disekitar  $\pm 5\%$  dari nilai *steady state*. Parameter kedua adalah persentase *overshoot*, yaitu nilai maksimal dari respon dibandingkan dengan nilai *steady state* (Nise, 2011). Parameter ketiga adalah *root mean square error* (RMSE), yaitu nilai akar dari rata-rata error kuadrat. RMSE dapat dihitung dengan persamaan 2.54. (Willmott,2005)

$$RMSe = \sqrt{\frac{e_1^2 + e_2^2 + \dots + e_n^2}{n}} \quad (2.54)$$

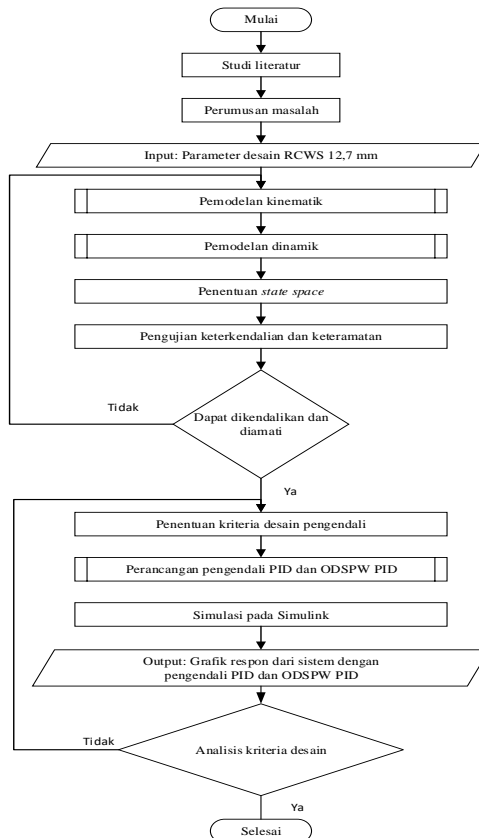
***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***



## BAB III METODOLOGI

### 3.1 *Flowchart* Penelitian

Pemodelan dinamik serta perancangan pengendali PID dan ODSPW PID pada aplikasi RCWS 12.7 mm akan dilakukan sesuai dengan tahap-tahap seperti pada gambar 3.1 dibawah ini.



Gambar 3.1 *Flowchart* penelitian

### 3.2 Kajian Metode

Penelitian ini bertujuan untuk membandingkan performa dari pengendali PID dengan ODSPW PID. Pengendali ODSPW menggunakan *weighting factor* (faktor pemberat) dengan nilai berubah-ubah pada bagian *proportional* dari PID. Hal ini bertujuan untuk mengurangi *overshoot* dari pengendali PID. Karakteristik yang demikian menyebabkan penggunaan energi yang lebih efisien. Sementara, *settling time* ditentukan oleh pengaturan parameter PID. Selain menggunakan faktor pada bagian *proportional*, terdapat kemungkinan untuk menambahkan faktor pemberat pada bagian *integral* dan *derivative* dari PID.

Bagian *integral* bertujuan untuk menghilangkan *steady state error* yang dihasilkan oleh sistem. Hal ini dilakukan dengan mengolah nilai *error* yang telah terjadi di masa lampau hingga sekarang. Penggunaan *weighting factor* pada bagian *integral* tidak diinginkan karena akan memunculkan *steady state error* kembali. Selain itu, bagian *integral* bekerja berdasarkan nilai *error* di masa lampau. Sehingga, penggunaan *weighting factor* tidak akan membantu dan hanya menyebabkan sistem berjalan lebih lambat.

Bagian *derivative* bertujuan untuk meminimalkan *settling time* dan membuat sistem menjadi stabil. Akan tetapi, bagian *derivative* juga dapat menyebabkan sistem menjadi tidak stabil apabila nilai tidak tepat. Bagian *derivative* memiliki faktor pemberat dengan simbol  $\gamma$ . Faktor pemberat  $\gamma$  umumnya bernilai 0. Hal ini dilakukan untuk mencegah sistem menjadi tidak stabil akibat perubahan nilai pada bagian *derivative*.

### 3.3 Metode Penelitian

Dalam melakukan pemodelan serta perancangan pengendali PID dan ODSPW pada sistem RCWS 12.7 mm, terdapat beberapa tahap yang akan dilakukan, yaitu:

1. Studi literatur

Sebagai upaya untuk memperdalam pemahaman mengenai permasalahan yang dibahas, maka dilakukan studi literature yang berhubungan dengan pemodelan kinematik dan dinamik dari *manipulator*, perancangan pengendali PID, dan pengaruh *set-point weighting* pada respon sistem. Studi literatur dilakukan dengan membaca buku teks, jurnal, *e-book*, dan penelitian terdahulu.

2. Perumusan masalah

Hasil dari studi literatur digunakan untuk mempertajam permasalahan yang akan diselesaikan. Perumusan masalah terdiri atas penguraian permasalahan serta batasan-batasan yang akan digunakan. Dengan demikian, penelitian dapat dilakukan dengan tujuan yang jelas dan dapat dilakukan secara sistematis.

3. Pemodelan kinematik

Tahap pemodelan sistem secara kinematik akan dilakukan terlebih dahulu. Pada tahapan ini, sistem akan dimodelkan sesuai dengan posisinya relatif terhadap waktu. Pemodelan kinematik akan dilakukan berdasarkan nilai dari parameter DH yang telah ditetapkan sebelumnya. Pemodelan *direct kinematics* dan *inverse kinematics* akan dilakukan agar dapat digunakan untuk suatu sistem *closed-loop*.

4. Pemodelan dinamik

Pada tahapan pemodelan dinamik, parameter massa dan inersia dari sistem akan diperhitungkan. Nilai dari massa dan inersia akan diperoleh dengan menganalisa desain yang telah diberikan dengan *Solidworks*. Dengan demikian, dapat diperoleh gaya yang diperlukan untuk menggerakkan sistem. Akan

dilakukan pemodelan *direct dynamics* dan *inverse dynamics* agar dapat diperoleh *inverse dynamics model*.

5. Penentuan *State Space*

Persamaan gerak Lagrangian yang telah diperoleh pada tahap sebelumnya merupakan suatu persamaan dinamik non-linier. Persamaan tersebut akan direpresentasikan dalam suatu *state space*. Hal ini dilakukan untuk memudahkan tahap simulasi. Persamaan direpresentasikan dalam bentuk *state space* dengan menggunakan matriks Jacobian. Keluaran dari tahap ini adalah representasi *state space* dengan matriks A, B, C, dan D.

6. Penentuan kriteria desain pengendali

Parameter yang akan dievaluasi untuk dijadikan bahan pengujian performa sistem ditentukan. *Settling time*, *% overshoot*, dan berbagai parameter lainnya dapat dijadikan acuan. Batas maksimum dan minimum dari masing-masing parameter harus ditentukan.

7. Pengujian keterkendalian dan keteramatan

*State space* yang telah diperoleh diuji untuk menentukan apakah sistem tersebut dapat dikendalikan dan diamati. Pengujian akan dilakukan dengan menentukan *rank* dari *lie derivative* dan *lie bracket*. Apabila nilai dari *rank* sama dengan dimensi matriks, maka sistem dinyatakan dapat dikendalikan dan diamati.

8. Perancangan pengendali PID dan ODSPW PID

Suatu pengendali PID dan ODSPW PID akan dirancang untuk sistem yang telah diperoleh agar performa dari sistem sesuai dengan yang diharapkan. Terdapat 3 parameter yang akan dioptimalkan nilainya, yaitu  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ . Perancangan pengendali akan didasarkan pada metode optimasi stokastik, yaitu *GRG*

*Nonlinear*. Metode tersebut memerlukan persamaan antara parameter pengendali dan respon dari sistem. Persamaan tersebut dapat diperoleh dengan melakukan analisis regresi. Nilai parameter hasil optimasi kemudian digunakan pada pengendali PID dan ODSPW PID.

9. Simulasi pada Matlab dan Simulink

Simulasi bertujuan untuk mengetahui hasil respon dari sistem dengan menggunakan pengendali PID dan ODSPW PID. Dapat dilihat apakah penggunaan *set-point weighting* berpengaruh terhadap respon yang dihasilkan. Hasil dari simulasi akan berupa grafik respon dari sistem. Grafik tersebut akan digunakan untuk membandingkan performa dari kedua pengendali yang digunakan, sehingga dapat ditentukan pengendali yang lebih unggul.

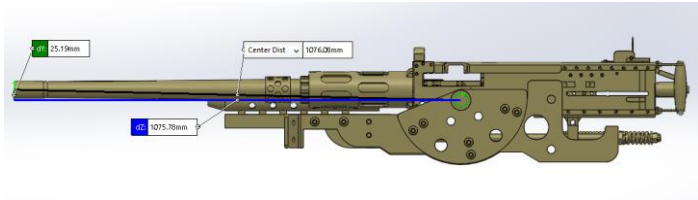
10. Analisis kriteria desain

Kriteria desain yang telah ditentukan sebelumnya digunakan sebagai acuan dalam mengevaluasi performa sistem. Apabila ada parameter performa yang tidak terpenuhi, maka pengendali perlu dirancang ulang.

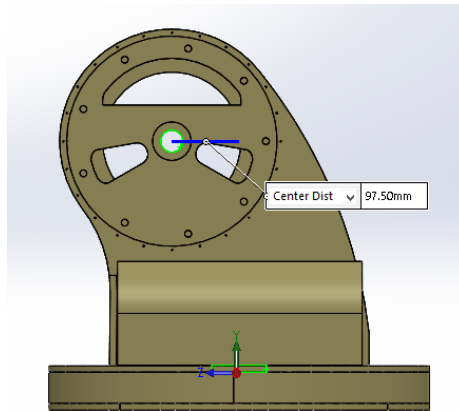
### **3.4 Spesifikasi dan Kriteria Desain dari RCWS 12.7 mm**

#### **3.4.1 Spesifikasi Alat**

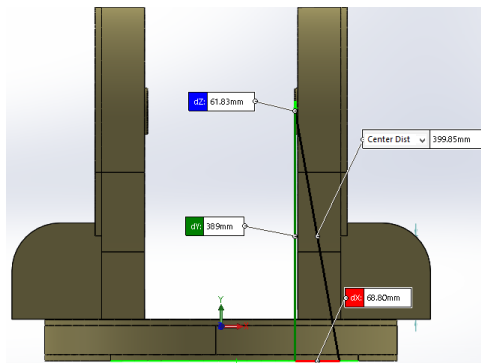
Pemodelan sistem dan perancangan pengendali PID pada sistem RCWS 12.7 mm dilakukan berdasarkan desain sesuai gambar 3.2 hingga gambar 3.4. Desain dari RCWS 12.7 mm didasarkan pada desain RCWS ITS (Wahyudi, 2016). Selain itu, telah diperoleh matriks inersia untuk masing-masing link dengan menggunakan Solidworks. Parameter desain yang akan digunakan telah dirangkum pada tabel 3.1.



Gambar 3.2 Parameter  $a_2$  pada lengan 2 (Wahyudi, 2016)



Gambar 3.3 Parameter  $a_1$  pada lengan 1 (Wahyudi, 2016)



Gambar 3.4 Parameter  $d_1$  pada lengan 1 (Wahyudi, 2016)

Tabel 3.1 Parameter desain dari RCWS

| Parameter                | Ukuran   |
|--------------------------|--|
| Panjang a lengan 1       | 97.5 mm  |
| Panjang d lengan 1       | 389 mm   |
| Panjang d lengan 2       | 1075.78 mm   |
| Matriks inersia lengan 1 | $\begin{bmatrix} 1 & -0.02 & -0.01 \\ -0.02 & -0.63 & -0.78 \\ 0.01 & 0.78 & -0.63 \end{bmatrix} \text{ Kg m}^2$ |
| Matriks inersia lengan 2 | $\begin{bmatrix} 0.00 & 0.00 & 1.00 \\ -0.07 & -1.00 & 0.00 \\ 1.00 & -0.07 & 0.00 \end{bmatrix} \text{ Kg m}^2$ |

Sistem RCWS 12,7mm pada penelitian ini diasumsikan menggunakan motor Rexroth MAD100B dengan 50 *winding*. Motor tersebut memiliki kecepatan putaran 500 rpm, arus maksimum 5,3 Ampere, dan konstanta torsi 7,66  $\text{Nm/A}$ . Motor tersebut akan dihubungkan ke susunan gigi (*gear box*) dengan rasio reduksi kecepatan 1:16,67. Sehingga, kecepatan putaran maksimum dari motor menjadi 30 rpm. Spesifikasi dari motor dapat dilihat pada lampiran D.

### 3.4.2 Kriteria Desain Pengendali

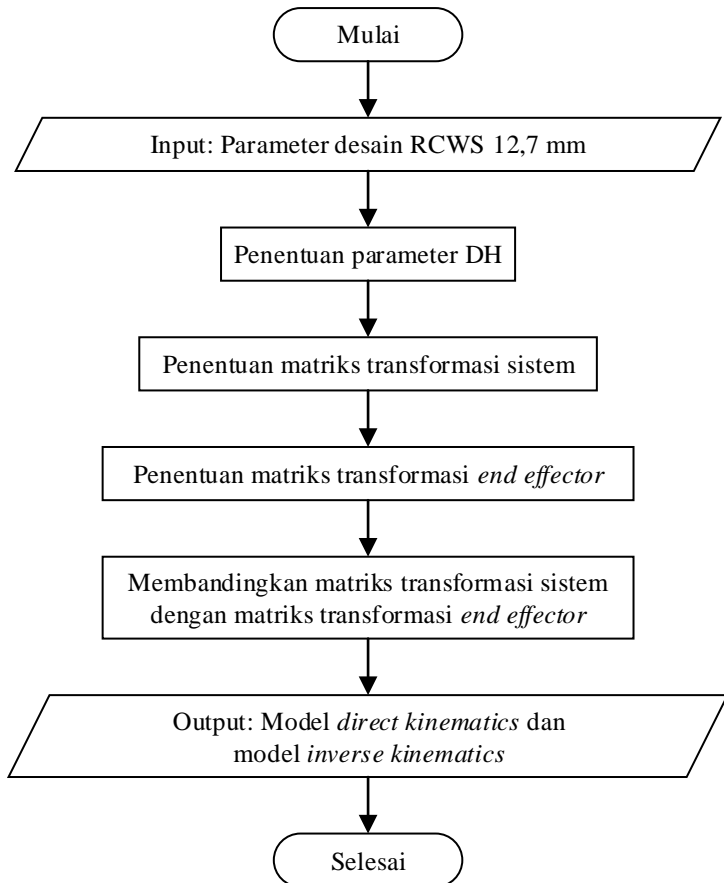
Pengendali yang akan didesain harus mampu memenuhi kriteria performa yang diinginkan. RCWS merupakan sistem yang memerlukan gerakan cepat dan tepat. Kriteria desain dari pengendali yang diharapkan dapat dilihat pada tabel 3.2.

Tabel 3.2 Kriteria Desain Pengendali

| Parameter Performa                   | Nilai Maksimum               |
|--------------------------------------|------------------------------|
| <i>Settling time</i> gerakan azimut  | 2 sekon                      |
| <i>Settling time</i> gerakan elevasi | 2 sekon                      |
| <i>Overshoot</i>                     | 20 %                         |
| <i>Root mean square error</i>        | 0,01 radians (0,573 degree). |

### 3.5 Flowchart pemodelan kinematik

Pada tahap pemodelan kinematik dari sistem, akan dilakukan beberapa tahapan untuk memperoleh model *direct kinematics* dan model *inverse kinematics*. Tahap-tahap yang akan dilakukan dapat dilihat pada gambar 3.5.

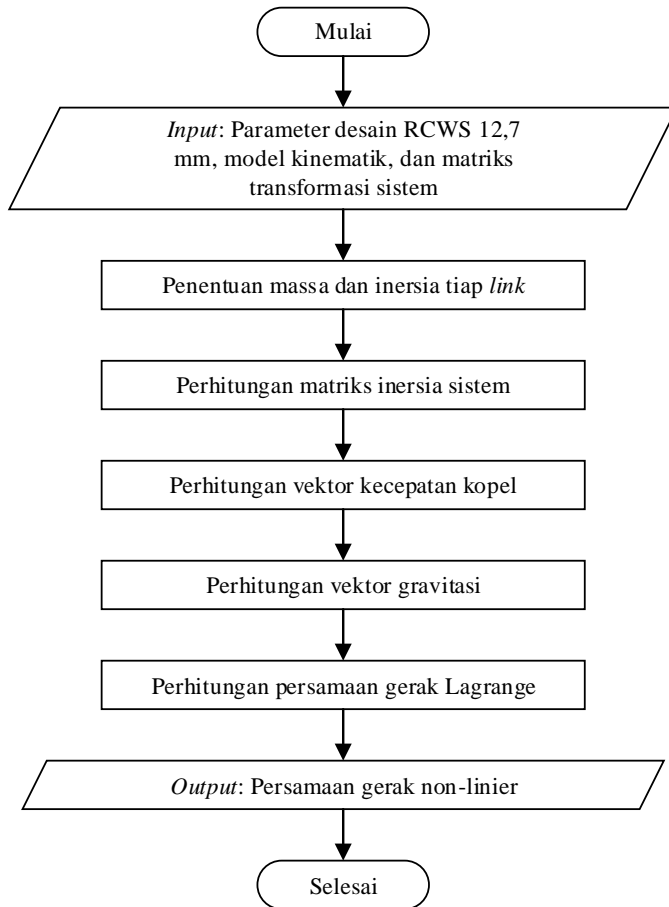


Gambar 3.5 Flowchart pemodelan kinematik



### 3.6 Flowchart pemodelan dinamik

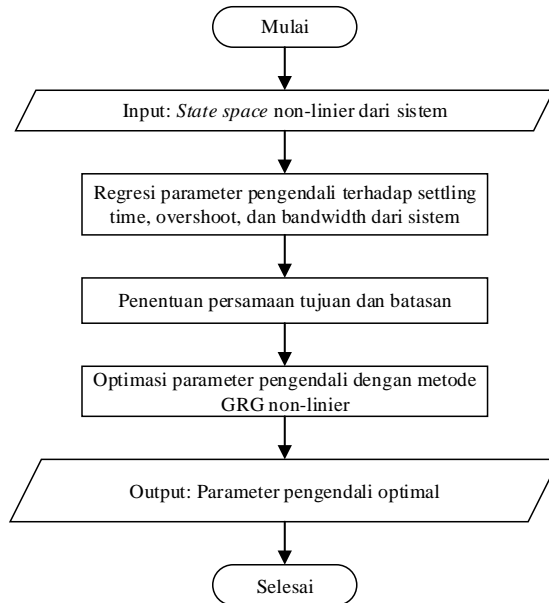
Pada tahap pemodelan dinamik dari sistem, akan dilakukan beberapa tahapan untuk memperoleh persamaan gerak non-linier dari sistem. Tahap-tahap yang akan dilakukan dapat dilihat pada gambar 3.6.



Gambar 3.6 Flowchart pemodelan dinamik

### 3.7 Flowchart Perancangan Pengendali

*State space* yang merepresentasikan sistem akan dikendalikan agar dapat memperoleh hasil yang sesuai dengan kriteria yang telah ditentukan. Pertama, parameter dari pengendali, yaitu  $K_p$ ,  $K_i$ , dan  $K_d$ , akan diregresi terhadap *settling time*, *overshoot*, dan *bandwidth* dari sistem. Regresi akan dilakukan dengan menggunakan desain eksperimen *response surface* dari Minitab. Ditentukan persamaan tujuan dan batasan dari hasil regresi. Persamaan hasil regresi kemudian diolah dengan metode *GRG non-linear* untuk memperoleh pengaturan parameter pengendali yang optimal. Parameter pengendali optimal kemudian dimasukkan sebagai parameter dari kedua pengendali yang dibandingkan, yaitu PID dan ODSPW PID.



Gambar 3.7 Flowchart perancangan pengendali



***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BAB IV HASIL DAN PEMBAHASAN

### 4.1 Hasil Pemodelan Kinematik

Pemodelan kinematik dimulai dengan memperoleh matriks dari parameter DH, sesuai dengan persamaan 2.9 hingga 2.15. Matriks yang diperoleh dapat dilihat pada persamaan 4.1.

$${}^0A_2 = \begin{bmatrix} \cos(\theta_1) \cos(\theta_2) & -\cos(\theta_1) \sin(\theta_2) & -\sin(\theta_1) & 0.0975 \cos(\theta_1) + \sin(\theta_1) \sin(\theta_2) \\ \cos(\theta_2) \sin(\theta_1) & -\sin(\theta_1) \sin(\theta_2) & \cos(\theta_1) & 0.0975 \sin(\theta_1) + \sin(\theta_1) \cos(\theta_2) \\ -\sin(\theta_1) & -\cos(\theta_2) & 0 & 0.389 - 1.076 \sin(\theta_2) \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

Matriks kinematik kemudian dibandingkan dengan matriks *end effector*. Persamaan kinematik untuk sudut *joint* terhadap posisi dan orientasi *end effector* diperoleh sesuai persamaan 4.2.

$$\theta_1 = -\log \left[ \frac{(-0.5 \exp(2\theta_2 i) - 0.25 \exp(4\theta_2 i) + \exp(2\theta_2 i) \cos^2(\psi) \cos^2(\theta) - 0.25)^{0.5} + \exp(\theta_2) \cos(\psi) \cos(\theta)}{0.5i \exp(2\theta_2) + 0.5} \right] \quad (4.2)$$

$$\theta_2 = -\text{asin}(\sin(\psi)) \quad (4.3)$$

Pemodelan kinematik juga menghasilkan matriks Jacobian yang menjelaskan hubungan antara *joint* dengan *end effector*, sesuai persamaan 4.4 dan 4.5.

$$J_1 = \begin{bmatrix} -a_1 \sin(\theta_1) & 0 \\ a_1 \cos(\theta_1) & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (4.4)$$

$$J_2 = \begin{bmatrix} -d_2 \sin(\alpha_2) \cos(\theta_2) - a_2 \cos(\theta_2) \sin(\theta_2) - a_2 \cos(\alpha_2) \cos(\theta_2) \sin(\theta_2) & -a_2 \cos(\alpha_2) \sin(\theta_2) - d_2 \sin(\alpha_2) \cos(\theta_2) \\ a_1 \cos(\theta_2) + a_2 \cos(\theta_2) \cos(\theta_2) + d_2 \sin(\alpha_2) \sin(\theta_2) - a_2 \cos(\alpha_2) \cos(\theta_2) \sin(\theta_2) & a_2 \cos(\alpha_2) \cos(\theta_2) - d_2 \sin(\alpha_2) \sin(\theta_2) \\ 0 & a_2 \sin(\alpha_2) \cos(\theta_2) \cos(\theta_2) + d_2 \sin(\alpha_2) \sin(\theta_2) \sin(\theta_2) \\ 0 & \sin(\alpha_2) \sin(\theta_2) \\ 0 & -\sin(\alpha_2) \cos(\theta_2) \\ 1 & \cos(\alpha_2) \end{bmatrix} \quad (4.5)$$

## 4.2 Hasil Pemodelan Dinamik

Model dinamik dari sistem diperoleh dengan memperhitungkan inersia dari masing-masing lengan. Beberapa gaya yang dominan mempengaruhi model dinamik antara lain gaya akibat inersia, gaya akibat kecepatan kopel, dan gaya gravitasi. Gaya-gaya tersebut harus dilawan oleh torsi yang diberikan pada sistem agar dapat bergerak sesuai dengan yang diinginkan. Penelitian ini menggunakan model dinamik non-linier agar diperoleh hasil yang menyerupai keadaan sesungguhnya.

$$\begin{aligned} \tau_1 = & 0.541\ddot{\theta}_1 - \dot{\theta}_2^2 \cos(\theta_2) + 0.918\dot{\theta}_1 \cos(2\theta_2) \\ & - 0.035\ddot{\theta}_1 \sin(2\theta_2) + 1.03\ddot{\theta}_1 \cos(\theta_2) \\ & - \ddot{\theta}_2 \sin(\theta_2) - 1.03\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) \\ & - 0.07\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \cos(2\theta_2) \\ & - 1.84\dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(2\theta_2) \end{aligned} \quad (4.6)$$

$$\begin{aligned} \tau_2 = & 2.84\ddot{\theta}_2 - 51.7 \cos(\theta_2) + 0.514 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2) \\ & - 0.035 \dot{\theta}_1^2 \cos(2\theta_2) \\ & + 0.07 \ddot{\theta}_1 \cos(\theta_2) + 0.918 \dot{\theta}_1^2 \sin(\theta_2) \\ & - \ddot{\theta}_1 \sin(\theta_2) - 0.035 \dot{\theta}_1 \dot{\theta}_2 \sin(\theta_2) \end{aligned} \quad (4.7)$$

## 4.3 Hasil State Space

Model dinamik yang telah diperoleh kemudian diolah lebih lanjut untuk menemukan persamaan dinamik dari masing-masing *state*. Terdapat 4 *state* yang telah ditentukan, yaitu:

$$\begin{aligned}
x_1 &= \theta_1 \\
x_2 &= \dot{\theta}_1 \\
x_3 &= \theta_2 \\
x_4 &= \dot{\theta}_2
\end{aligned} \tag{4.8}$$

Berdasarkan persamaan dinamik, diperoleh persamaan untuk turunan dari persamaan 4.8, yaitu persamaan 4.9.

$$\begin{aligned}
\dot{x}_1 &= \dot{\theta}_1 \\
\dot{x}_2 &= \left[ \frac{50 u_1 + 911 \cos(x_3) \sin(x_3) + 17.6 u_2 \sin(x_3)}{45.9 \cos(2x_3) - 1.75 \sin(2x_3) + 51.4 \cos(x_3) + 1.23 \cos(x_3) \sin(x_3) - 17.6 \sin^2(x_3) + 27} \right] \\
\dot{x}_3 &= \dot{\theta}_2 \\
\dot{x}_4 &= \left[ \frac{\left( \frac{0.353 u_2 + 18.2 \cos(x_3) - 0.0247 u_1 \cos(x_3)}{0.918 \cos(2x_3) - 0.035 \sin(2x_3) + 1.03 \cos(x_3) + 0.541} \right)}{\left( \frac{0.0247 \cos(x_3) \sin(x_3)}{0.918 \cos(2x_3) - 0.035 \sin(2x_3) + 1.03 \cos(x_3) + 0.541} \right)} \right] \\
&\quad - \left[ \frac{0.353 \sin^2(x_3)}{0.918 \cos(2x_3) - 0.035 \sin(2x_3) + 1.03 \cos(x_3) + 0.541} \right] \\
&\quad + 1
\end{aligned} \tag{4.9}$$

Persamaan 4.9 kemudian dimasukkan kedalam matriks Jacobian, sehingga diperoleh nilai matriks A, B, C, dan D untuk representasi *state space*. Persamaan dari matriks A, B, C, dan D dapat dilihat pada lampiran A.

#### 4.4 Hasil Analisis Keterkendalian dan Keteramatan dari Sistem

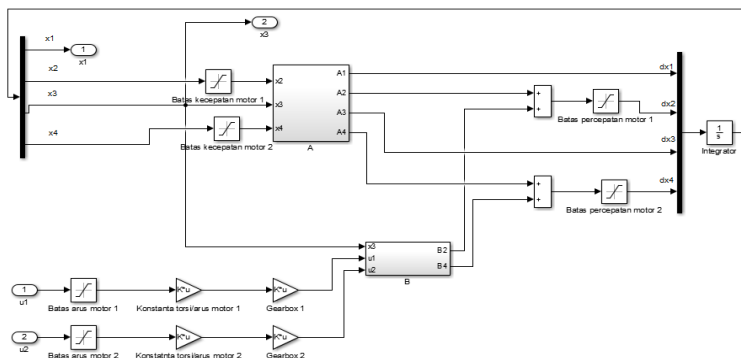
Pengujian keterkendalian dilakukan dengan menggunakan *lie bracket*. Perhitungan untuk memperoleh

matriks keterkendalian dari sistem terdapat pada lampiran C.2. Hasil pengujian *rank* pada Matlab menghasilkan nilai 4. Dengan demikian, sistem dapat dikendalikan.

Pengujian keteramatan dilakukan dengan menggunakan *lie derivative*. Perhitungan untuk memperoleh matriks keteramatan dari sistem terdapat pada lampiran C.2. Hasil pengujian *rank* pada Matlab menghasilkan nilai 2 untuk masing-masing matriks. Dengan demikian, sistem dapat diamati.

#### 4.5 Model Simulink

*State space* yang telah diperoleh terdiri atas persamaan non-linier. Persamaan non-linier dapat memberikan hasil yang lebih mendekati kenyataan. Akan tetapi, Simulink tidak dapat mengolah *state space* non-linier secara otomatis. Oleh karena itu, perlu disusun matriks *state space* secara manual. *State space* dapat disusun secara umum seperti gambar 4.1.



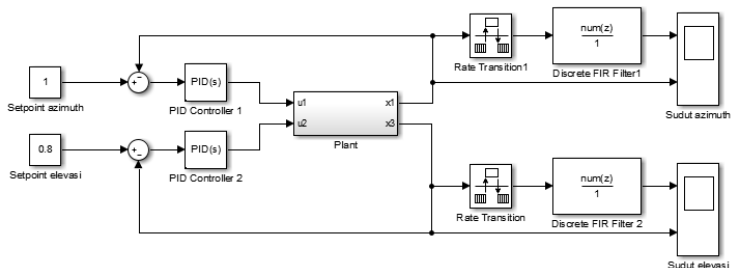
Gambar 4.1 Block diagram dari plant

Pada gambar 4.1, dapat dilihat bahwa selain matriks *state space*, terdapat pula beberapa blok *saturation*. Blok tersebut diberikan untuk membatasi kecepatan sudut dan



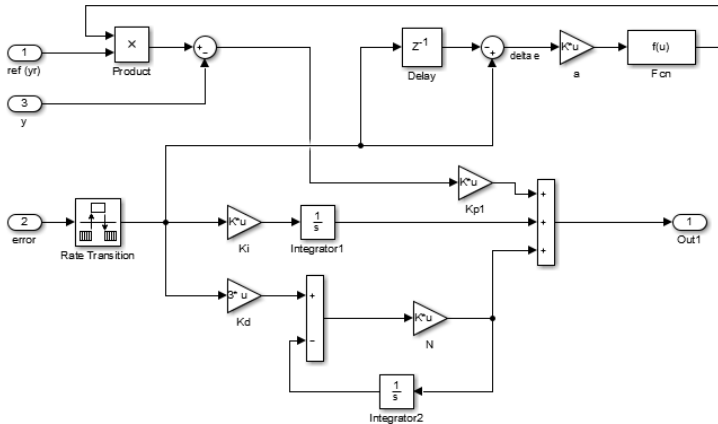
percepatan sudut dari sistem. Batasan yang diberikan sesuai dengan kecepatan sudut dan percepatan sudut maksimum dari spesifikasi motor yang akan menggerakkan sistem. *Input* ( $u_1$  dan  $u_2$ ) yang diberikan merupakan arus listrik. Sebelum *input* dimasukkan kedalam *state space*, arus listrik diubah terlebih dahulu menjadi torsi dari motor. Terdapat blok *saturation* untuk memberikan batasan arus listrik yang dapat diterima oleh motor. Spesifikasi dari motor diwakili oleh konstanta torsi motor dibanding arus listrik. Selain itu, torsi yang dihasilkan oleh motor juga dikalikan reduksi dari *gearbox*, yang mengubah kecepatan sudut menjadi torsi.

Sistem yang sudah dibuat merupakan sub-sistem *plant* dari keseluruhan sistem pengendalian. Pengendali yang akan digunakan adalah PID dan ODSPW PID. Pengendali PID telah tersedia pada *library* dari Simulink, sehingga dapat langsung digunakan untuk membuat suatu *close loop* seperti pada gambar 4.2. *Output* yang dihasilkan berosilasi. Filter *moving average* digunakan untuk mempermudah menganalisa *output* sistem, yang diwakili oleh filter *discrete FIR*. Selain itu, filter *moving average* memerlukan data diskrit, sehingga digunakan blok *rate transition* untuk mengubah *output* sistem dari kontinu menjadi diskrit.



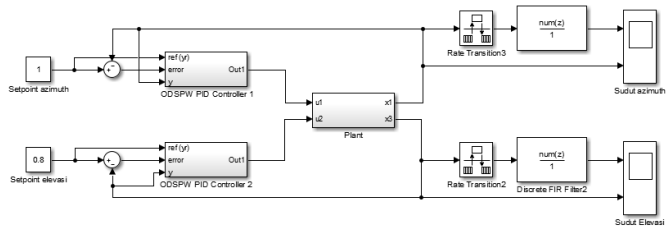
Gambar 4.2 Block diagram pengendali PID

Pengendali ODSPW PID tidak tersedia pada *library* dari Simulink, sehingga perlu disusun secara manual. Sub-sistem pengendali ODSPW PID disusun seperti gambar 4.3.



Gambar 4.3 Sub-sistem pengendali ODSPW PID

Pengendali ini memerlukan input diskrit, oleh karena itu digunakan blok *rate transition* pada *input*. Selain itu, digunakan blok *delay* untuk menghitung  $\Delta e$ . Sub-sistem ini dibuat berdasarkan gambar 3.9. Sub-sistem pengendali kemudian digabungkan dengan *plant*, menghasilkan suatu *close loop*. Filter *moving average* juga digunakan untuk mempermudah menganalisa *output* dari sistem.



Gambar 4.4 Block diagram pengendali ODSPW PID

#### 4.6 Hasil Regresi dan Optimasi Parameter Pengendali

*Block diagram* yang telah dibuat memiliki 3 parameter yang harus diatur, yaitu Kp, Ki, dan Kd. Nilai dari ketiga parameter tersebut berada di *range* yang telah ditentukan berdasarkan hasil simulasi. Batasan dari tiap parameter dapat dilihat pada tabel 4.1 dan tabel 4.2.

Tabel 4.1 Batasan nilai parameter Kp, Ki, dan Kd untuk gerakan azimuth

| Parameter | Nilai Minimum | Nilai Maksimum |
|-----------|---------------|----------------|
| Kp        | 30            | 70             |
| Ki        | 20            | 40             |
| Kd        | 1             | 5              |

Tabel 4.2 Batasan nilai parameter Kp, Ki, dan Kd untuk gerakan elevasi

| Parameter | Nilai Minimum | Nilai Maksimum |
|-----------|---------------|----------------|
| Kp        | 20            | 39             |
| Ki        | 20            | 40             |
| Kd        | 5             | 10             |

Ketiga parameter tersebut akan dievaluasi terhadap *settling time*, *overshoot*, dan RMSE. Definisi dari ketiga kriteria performa tersebut dapat dilihat pada sub-bab 2.11 Optimasi parameter pengendali memerlukan persamaan yang menghubungkan masing-masing keadaan dengan ketiga parameter. Suatu *design of experiment* (DOE) diperlukan untuk melakukan regresi. DOE *response surface* dipilih karena

memiliki jumlah eksperimen yang relatif sedikit dan mampu menghasilkan persamaan kuadratik. Data yang telah diambil kemudian diolah secara regresi dan menghasilkan persamaan kuadratik. Regresi untuk masing-masing kriteria performa dapat dilihat pada lampiran B. Persamaan untuk pengendali PID gerakan azimuth dapat dilihat pada persamaan 4.10 hingga 4.12.

$$\begin{aligned} T_s = & 1,48 - 0,0302 A + 0,0200 B + 0,459 C + 0,000227 A^2 \\ & - 0,000769 B^2 - 0,0801 C^2 \\ & + 0,000038 AB - 0,00042 AC + 0,00622 BC \end{aligned} \quad (4.10)$$

$$\begin{aligned} \%OS = & 1,68 - 0,0020 A - 0,0339 B + 0,344 C - 0,000136 A^2 \\ & + 0,000290 B^2 + 0,0080 C^2 + 0,000832 AB \\ & - 0,00338 AC - 0,00929 BC \end{aligned} \quad (4.11)$$

$$\begin{aligned} RMSE = & 0,0001 + 0,001004 A + 0,000911 B - 0,01616 C \\ & - 0,000013 A^2 - 0,000013 B^2 \\ & + 0,000609 C^2 - 0,000005 AB \\ & + 0,000169 AC + 0,000093 BC \end{aligned} \quad (4.12)$$

Persamaan untuk pengendali PID gerakan elevasi dapat dilihat pada persamaan 4.13 hingga 4.15.

$$\begin{aligned} T_s = & -2,121 + 0,0815 A + 0,0166 B + 0,761 C \\ & - 0,000501 A^2 + 0,000732 B^2 \\ & - 0,01693 C^2 - 0,000900 AB \\ & - 0,00285 AC - 0,00946 BC \end{aligned} \quad (4.13)$$

$$\begin{aligned} \%OS = & 2,799 - 0,0380 A - 0,01472 B - 0,2454 C \\ & + 0,000580 A^2 + 0,000054 B^2 \\ & + 0,01907 C^2 + 0,000201 AB \\ & - 0,001528 AC + 0,001251 BC \end{aligned} \quad (4.14)$$

$$\begin{aligned} RMSE = & -0,0092 + 0,000025 A + 0,000725 B + 0,00249 C \\ & - 0,000033 A^2 - 0,000006 B^2 \\ & - 0,000240 C^2 + 0,000028 AB \\ & + 0,000174 AC - 0,000151 BC \end{aligned} \quad (4.15)$$

Persamaan untuk pengendali ODSPW PID gerakan azimut dapat dilihat pada persamaan 4.16 hingga 4.18.

$$\begin{aligned} T_s = & 2,37 + 0,1804 A - 0,1588 B - 0,154 C + 0,000154 A^2 \\ & + 0,002622 B^2 - 0,0577 C^2 \\ & - 0,003699 AB - 0,00095 AC \\ & + 0,01523 BC \end{aligned} \quad (4.16)$$

$$\begin{aligned} \%OS = & 0,8529 + 0,00038 A + 0,00993 B + 0,0019 C \\ & + 0,000012 A^2 - 0,000135 B^2 \\ & - 0,002031 C^2 - 0,000058 AB \\ & - 0,000195 AC + 0,000691 BC \end{aligned} \quad (4.17)$$

$$\begin{aligned} RMSE = & -0,133 - 0,00035 A + 0,01362 B - 0,0235 C \\ & + 0,000039 A^2 + 0,000036 B^2 \\ & - 0,00030 C^2 - 0,000232 AB \\ & + 0,000852 AC - 0,000889 BC \end{aligned} \quad (4.18)$$

Persamaan untuk pengendali ODSPW PID gerakan elevasi dapat dilihat pada persamaan 4.19 hingga 4.21.

$$\begin{aligned} T_s = & 2 + 0,1613 A - 0,1587 B - 0,075 C + 0,001649 A^2 \\ & + 0,003089 B^2 + 0,00549 C^2 \\ & - 0,004348 AB - 0,00560 AC \\ & + 0,00331 BC \end{aligned} \quad (4.19)$$

$$\begin{aligned} \%OS = & 1,062 - 0,00819 A + 0,00488 B + 0,0054 C \\ & + 0,000279 A^2 - 0,000022 B^2 \\ & - 0,000203 C^2 - 0,000217 AB \\ & - 0,000499 AC + 0,000474 BC \end{aligned} \quad (4.20)$$

$$\begin{aligned} RMSE = & -0,004 - 0,0057 A + 0,0154 B + 0,006 C \\ & + 0,000078 A^2 - 0,000111 B^2 \\ & - 0,00854 C^2 - 0,000616 AB \\ & + 0,00301 AC + 0,00078 BC \end{aligned} \quad (4.21)$$

Dimana A adalah Kp, B adalah Ki, dan C adalah Kd.

Persamaan kuadratik dari masing-masing keadaan yang telah diperoleh kemudian dioptimasi untuk mendapatkan nilai parameter optimal. Metode optimasi yang digunakan adalah GRG non-linier. Fungsi tujuan dan batasan dimasukkan pada *solver* Microsoft Excel. Parameter yang mempengaruhi fungsi tujuan juga didefinisikan. Nilai optimal dari masing-masing parameter yang diperoleh untuk pengendali dapat dilihat pada tabel 4.3 dan tabel 4.4.

Tabel 4.3 Nilai Kp, Ki, Kd optimal untuk pengendali PID gerakan azimuth

| Parameter | Nilai Optimal |
|-----------|---------------|
| Kp        | 37,98635      |
| Ki        | 40            |
| Kd        | 5             |

Tabel 4.4 Nilai Kp, Ki, Kd optimal untuk pengendali PID gerakan elevasi

| Parameter | Nilai Optimal |
|-----------|---------------|
| Kp        | 34,98213      |
| Ki        | 38,66332      |
| Kd        | 5,857146      |

Tabel 4.5 Nilai Kp, Ki, Kd optimal untuk pengendali ODSPW PID gerakan azimuth

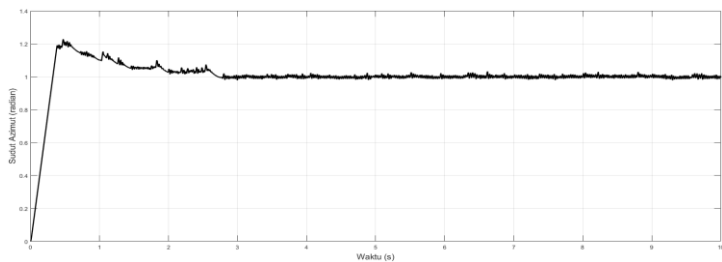
| Parameter | Nilai Optimal |
|-----------|---------------|
| Kp        | 30            |
| Ki        | 36,9222       |
| Kd        | 5             |

Tabel 4.6 Nilai  $K_p$ ,  $K_i$ ,  $K_d$  optimal untuk pengendali ODSPW PID gerakan elevasi

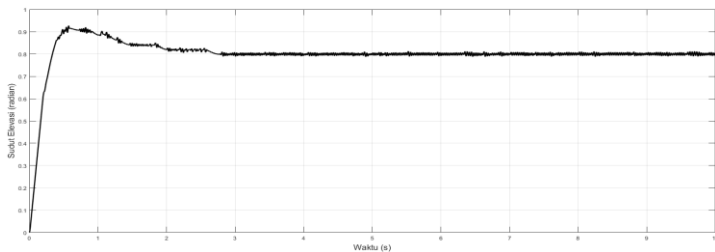
| Parameter | Nilai Optimal |
|-----------|---------------|
| $K_p$     | 22,83712      |
| $K_i$     | 40            |
| $K_d$     | 5             |

#### 4.7 Analisis Respon Pengendali PID

Pengendali PID diberikan nilai parameter hasil optimasi sesuai tabel 4.3 dan 4.4. Respon dari sistem akan digunakan untuk menentukan performa dari pengendali. Gambar 4.5 merupakan grafik pengendali PID gerakan azimuth dan gambar 4.6 merupakan grafik pengendali PID gerakan elevasi



Gambar 4.5 Grafik respon gerakan azimuth untuk pengendali PID



Gambar 4.6 Grafik respon gerakan elevasi untuk pengendali PID

Beberapa performa yang dievaluasi dari grafik respon adalah *settling time*, *overshoot*, dan RMSE. Perbandingan performa untuk pengendalian gerakan azimuth dapat dilihat pada tabel 4.7 dan pengendalian gerakan elevasi dapat dilihat pada tabel 4.8.

Tabel 4.7 Performa optimal pengendali PID untuk gerakan azimuth

| Parameter performa      | Performa        |
|-------------------------|-----------------|
| <i>Settling time</i>    | 2,554 sekon     |
| Persen <i>Overshoot</i> | 22,7 %          |
| RMSE                    | 0,009146 radian |

Tabel 4.8 Performa optimal pengendali PID untuk gerakan elevasi

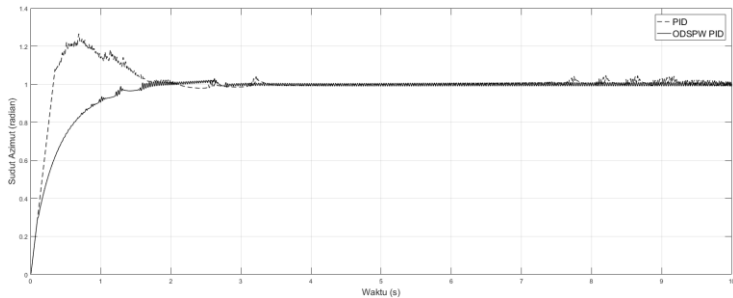
| Parameter performa      | Performa        |
|-------------------------|-----------------|
| <i>Settling time</i>    | 1,878 sekon     |
| Persen <i>Overshoot</i> | 15,83 %         |
| RMSE                    | 0,005513 radian |

#### 4.7 Analisis Respon Pengendali ODSPW PID

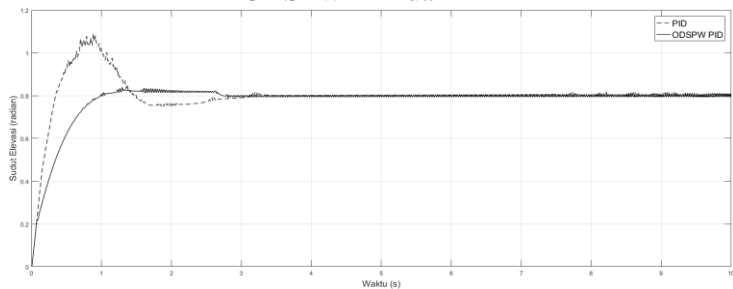
Pengendali ODSPW PID diberikan nilai parameter hasil optimasi. Respon dari sistem akan digunakan untuk menentukan performa dari pengendali. Selain itu, suatu pengendali PID akan diberikan nilai parameter yang sama sebagai pembanding. Kedua pengendali diberi parameter sesuai tabel 4.5 dan 4.6. Gambar 4.7 merupakan grafik perbandingan pengendali ODSPW PID dan PID gerakan azimuth dan gambar



4.8 merupakan grafik perbandingan pengendali ODSPW PID dan PID gerakan elevasi.



Gambar 4.7 Grafik respon gerakan azimuth untuk pengendali ODSPW PID dan PID



Gambar 4.8 Grafik respon gerakan elevasi untuk pengendali ODSPW PID dan PID

Perbandingan performa untuk pengendalian gerakan azimuth dapat dilihat pada tabel 4.5 dan pengendalian gerakan gerakan elevasi dapat dilihat pada tabel 4.6. *Overshoot* dan *settling time* dari pengendali ODSPW PID jauh lebih rendah dibandingkan pengendali PID. Sementara, RMSE dari PID lebih kecil dibandingkan pengendali ODSPW PID. Performa dari pengendali dapat dilihat pada tabel 4.9 hingga 4.12.

Tabel 4.9 Performa optimal pengendali ODSPW PID untuk gerakan azimut

| Parameter performa      | Performa        |
|-------------------------|-----------------|
| <i>Settling time</i>    | 1,271 sekon     |
| Persen <i>Overshoot</i> | 3 %             |
| RMSE                    | 0,006479 radian |

Tabel 4.10 Performa optimal pengendali ODSPW PID untuk gerakan elevasi

| Parameter performa      | Performa         |
|-------------------------|------------------|
| <i>Settling time</i>    | 0,797 sekon      |
| Persen <i>Overshoot</i> | 4,78 %           |
| RMSE                    | 0,0042545 radian |

Tabel 4.11 Performa pengendali PID untuk gerakan azimut

| Parameter performa      | Performa        |
|-------------------------|-----------------|
| <i>Settling time</i>    | 1,515 sekon     |
| Persen <i>Overshoot</i> | 26,6 %          |
| RMSE                    | 0,002548 radian |

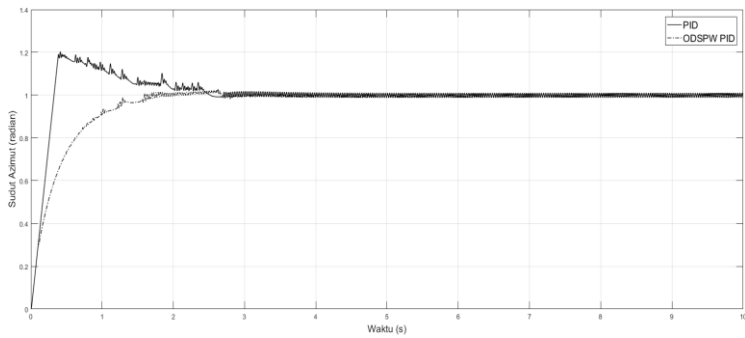
Tabel 4.12 Performa pengendali PID untuk gerakan elevasi

| Parameter performa      | Performa        |
|-------------------------|-----------------|
| <i>Settling time</i>    | 2,205 sekon     |
| Persen <i>Overshoot</i> | 36,13 %         |
| RMSE                    | 0,001795 radian |

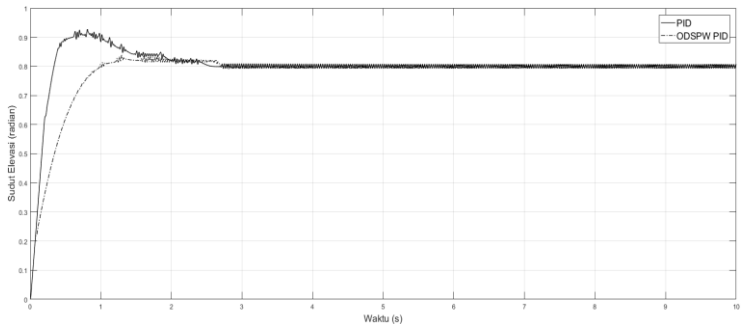
#### 4.8 Perbandingan Respon Pengendali PID dan ODSPW

Hasil optimal untuk pengendali PID dan ODSPW PID telah dibahas pada sub-bab sebelumnya. Gambar 4.9 menunjukkan perbandingan respon optimal untuk gerakan azimut pengendali PID dan ODSPW PID. Gambar 4.10 menunjukkan perbandingan respon optimal untuk gerakan

elevasi pengendali PID dan ODSPW PID. Pengendali PID memiliki performa optimal sesuai tabel 4.7 dan 4.8. Pengendali ODSPW PID memiliki performa optimal sesuai tabel 4.9 dan 4.10. Tabel-tabel tersebut menunjukkan bahwa pengendali ODSPW PID memiliki *settling time overshoot*, dan RMSE yang lebih rendah dibandingkan pengendali PID.



Gambar 4.9 Grafik perbandingan respon optimal untuk gerakan azimut pengendali PID dan ODSPW PID



Gambar 4.10 Grafik perbandingan respon optimal untuk gerakan elevasi pengendali PID dan ODSPW PID

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## **BAB V**

### **KESIMPULAN DAN SARAN**

#### **5.1 Kesimpulan**

Penelitian yang telah dilakukan berusaha memodelkan dan merancang pengendali untuk sistem RCWS 12,7mm. Beberapa kesimpulan dapat diperoleh dari penelitian tersebut, antara lain:

1. Model kinematik dari sistem RCWS kaliber 12,7mm diwakili oleh persamaan 4.2 dan 4.3. Selain itu, matriks Jacobian dari sistem dapat dilihat pada persamaan 4.4.
2. Model dinamik dari sistem RCWS kaliber 12,7mm diwakili oleh persamaan gerak dinamik non-linier pada persamaan 4.5 dan 4.6. Representasi *state space* dari sistem dapat dilihat pada persamaan 4.7 dan 4.8.
3. Pengendali ODSPW PID dan PID telah dirancang sesuai dengan metode optimasi GRG nonlinier. Pengendali ODSPW PID memiliki *settling time* lebih kecil dibanding pengendali PID, dengan selisih 50,23% untuk gerakan azimut dan 57,56% untuk gerakan elevasi. Pengendali ODSPW PID memiliki *overshoot* lebih rendah dibandingkan pengendali PID, dengan 86,78% lebih rendah untuk gerakan azimut dan 69,80% lebih rendah untuk gerakan elevasi. Pengendali PID memiliki *root mean square error* lebih rendah 29,15% dibanding pengendali ODSPW PID untuk gerakan azimut dan 22,82% lebih rendah untuk gerakan elevasi. Secara umum, pengendali ODSPW PID memiliki *settling time* dan *overshoot* yang lebih kecil. Kedua karakteristik tersebut diinginkan karena sistem memiliki respon yang cepat dan hemat energi. Oleh karena itu, disimpulkan bahwa pengendali ODSPW PID lebih unggul dibandingkan pengendali PID untuk sistem RCWS kaliber 12,7mm.

4. Hasil simulasi dari sistem RCWS 12,7 mm berupa grafik respon dari sistem dengan pengendali PID dan ODSPW. Grafik tersebut dapat dilihat pada gambar 4.5 dan 4.6 untuk pengendali PID. Grafik pada gambar 4.7 dan 4.8 menunjukkan respon pengendali ODSPW PID. Grafik pada gambar 4.9 dan 4.10 menunjukkan perbandingan antara respon optimal dari pengendali PID dan ODSPW PID.

Hasil pengujian keterkendalian dan keteramatan dari model sistem RCWS 12,7mm yang telah diperoleh menunjukkan bahwa sistem dapat dikendalikan dan diamati.

## 5.2 Saran

Beberapa saran yang dapat diberikan untuk memperoleh hasil pengendalian sistem RCWS kaliber 12,7mm, antara lain:

1. Penelitian lebih lanjut dapat menggunakan metode *tuning* heuristik untuk pengendali yang sedang berkembang pesat, seperti GA dan *neural network*. Penggunaan metode ini akan memerlukan daya komputasi yang lebih besar, namun dapat memberikan hasil yang lebih baik.
2. Penelitian lebih lanjut dapat memperhitungkan gesekan dan *losses* yang terjadi pada sistem. Keduanya memiliki peran besar, terutama dengan semakin banyaknya komponen bergerak dalam sistem. Dengan demikian, suatu simulasi yang lebih mendekati keadaan sebenarnya dapat diperoleh.

## DAFTAR PUSTAKA

- Alston, P., Nov. 2010. "*Lethal Robotic Technologies: Tech Implications for Human Rights and International Humanitarian Law.*" **Journal of Law, Information, and Science** **35**.
- Asada, H., dan Slotine, E.J.J. 1986. **Robot Analysis and Control**. John Wiley & Sons, Inc.
- Astrom, K.J. dan Hagglund T. 2001. "*The Future of PID Control.*" **Control Engineering Practice** **9** **1163-1175**.
- Cominos, P. dan Munro, N. "*PID Controllers: Recent Tuning Methods and Design to Specification.*" **IEE Proceedings Control Theory and Applications** vol. **149**.
- Delta, 2015. **Remote Controlled Weapon Station DRWS 1**, <URL: <http://delta.gov.ge/file/2015/01/drws-1.pdf>>
- Dey C., Mudi R.K. dan Lee T.T. 2006. "*A PID Controller with Dynamic Set-Point Weighting.*" **IEEE International Conference on Industrial Technology**.
- Friedland, B. 2005. **Control System Design: An Introduction to State-Space Methods**. New York: Dover Publications, Inc.
- Gomes, M.S. dan Ferreira, A.M. 2005. "*Gun-Turret Modeling and Control.*" **Proceedings of COBEM 2005**.
- Gu Y.L, Loh R.N.K., Coleman N., dan Lia C.F. 1992. "*Control of Weapon Pointing Systems Based on Robotic Formulation.*" **American Control Conference**.
- Hang, C.C., Astrom K.J., Ho W.K. 1991. "*Refinements of the Ziegler-Nichols Tuning Formula.*" **IEE Proceedings-D** **138** no.2.
- Hang, C.C dan Cao L. 1996. "*Improvement of Transient Response by Means of Variable Set Point Weighting.*" **IEEE Transactions on Industrial Electronics** **43** no. **4**.
- Harmon, M. 2011. **Advanced Regression in Excel**. Excel Master Series.

- Hedrick, J. K. dan Girard, A. 2015. "*Control of Nonlinear Dynamic System.*"
- Lasdon, L.S. 1975. **Design and Testin of a Generalized Reduced Gradient Code for Nonlinear Optimization.** Office of Naval Research.
- Mitra, P., Dey C., Mudi R.K. 2014. "*An Online Dynamic Set Point Weighting Scheme for PID Controller.*" **Proceeding of the 2014 IEEE Students' Technology Symposium**
- Montgomery, D. C. 2012. **Design and Analysis of Experiments.** John Wiley & Sons, Inc.
- Munadi dan Tauviquirrahman, M. 2007. "Konfigurasi Kinematik dan Dinamik Simulator Kendali *Turret.*" **Rotasi vol. 9 no. 1.**
- Mushonnifah, Siti. 2016. **Resolved Acceleration Control (RAC) DAN Active Force Control (AFC) pada Sistem Turret-Gun Kaliber 20 milimeter.** Surabaya: Jurusan Matematika, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Nise, N. S. 2011. **Control System Engineering sixth edition.** Jefferson City: John Wiley & Sons, Inc.
- Ogata, K. 2010. **Modern Control Engineering.** New Jersey: Prentice Hall.
- PUSPEN TNI, 2010. **Peran, Fungsi, dan Tugas TNI,** <URL: <http://tni.mil.id/pages-2-peran-fungsi-dan-tugas.html>>
- Robles, D.I. Aug. 2012. "*PID Control Dynamics of a Robotic Arm Manipulator with Two Degrees of Freedom.*" **Control de Procesos y Robotica**
- Sawitri, A.A. 2015. "Tahun Depan, TNI AD Modernisasi Alutsista." **Tempo** (Jakarta), 29 Desember.
- Siciliano, B., Sciavicco, L., Villani, L., dan Oriolo, G. 2009. **Robotics: Modelling, Planning and Control.** London: Springer.
- Supriyatno, Makmur. 2014. **Tentang Ilmu Pertahanan.** Jakarta: Yayasan Pustaka Obor.



- Tsai, Lung-Wen. 1999. **Robot Analysis the Mechanical of Serial and Parallel Manipulators**. John Wiley & Sons, Inc.
- Walchko, J. 2010. “*The Military Tank- An Example for Rigid Bod Kinematics.*” **American Society for Engineering Education**.
- Wahyudi, Imam. 2016. **Desain Konstruksi Rangka dan Cradle pada Remote Control Weapon System Kaliber 12.7 mm**. Surabaya: Jurusan Teknik Mesin, Institut Teknologi Sepuluh Nopember.
- Willmott, C. J., dan Matsuura, K. 2005. “*Advantages of the Mean Absolute error over the root mean square error in assessing average model performance.*” **Climate Research 30**.

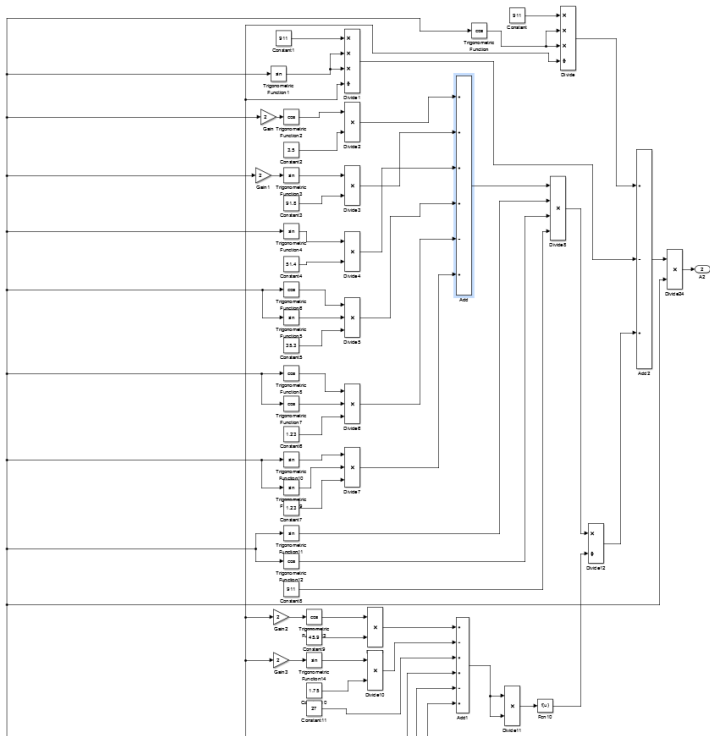
*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN A

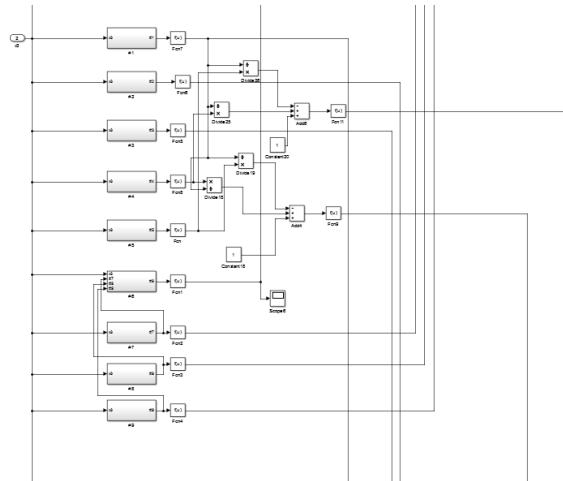
### **BLOCK DIAGRAM PLANT RCWS 12.7 mm**

#### **A.1 Block Diagram Plant**

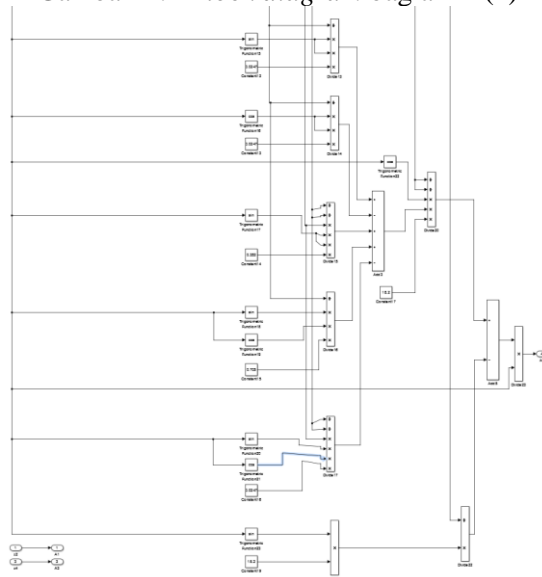
*Block diagram* dari plant RCWS 12,7 mm terdiri atas 2 bagian utama, yaitu bagian A dan bagian B. Bagian A mewakili reprenesasi *state space* matriks A dan bagian B mewakili reprenesasi *state space* matriks B. Gambar A.1 hingga A.3 akan menampilkan *block diagram* untuk bagian A dan gambar A.4 akan menampilkan *block diagram* untuk bagian B.



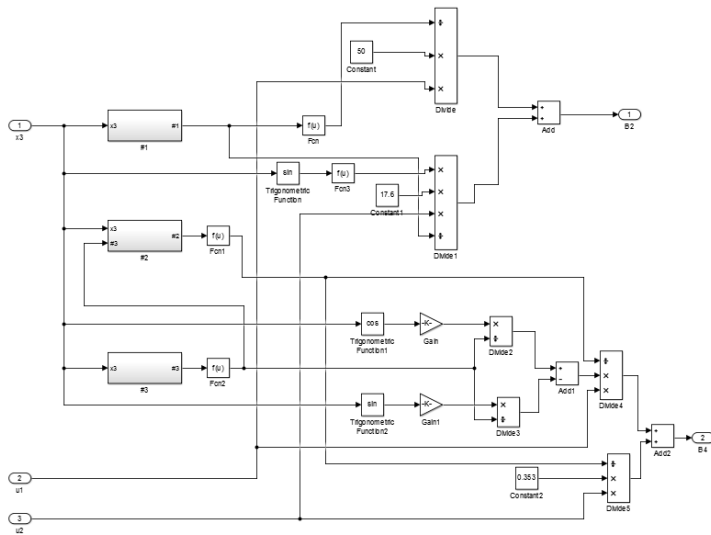
Gambar A.1 *Block diagram* bagian A (1)



Gambar A.2 Block diagram bagian A (2)



Gambar A.3 Block diagram bagian A (3)



Gambar A.4 Block diagram bagian B

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN B

### ANALISIS REGRESI DAN OPTIMASI PARAMETER PENGENDALI

#### B.1 Analisis Regresi Gerakan Azimut untuk Pengendali PID

Tabel B.1 Hasil pengambilan data untuk gerakan azimut pengendali PID

| No | A        | B        | C        | Settling Time | %OS     | RMSE      |
|----|----------|----------|----------|---------------|---------|-----------|
| 1  | 46,082   | 24,055   | 1,811    | 1,382         | 1,53077 | 0,0184430 |
| 2  | 63,918   | 24,055   | 1,811    | 1,347         | 1,55469 | 0,0162433 |
| 3  | 46,082   | 35,945   | 1,811    | 1,322         | 1,65600 | 0,0197909 |
| 4  | 63,918   | 35,945   | 1,811    | 1,231         | 1,65400 | 0,0147959 |
| 5  | 46,082   | 24,055   | 4,189    | 1,641         | 1,69800 | 0,0138232 |
| 6  | 63,918   | 24,055   | 4,189    | 1,524         | 1,37600 | 0,0171207 |
| 7  | 46,082   | 35,945   | 4,189    | 1,693         | 1,35800 | 0,0161400 |
| 8  | 63,918   | 35,945   | 4,189    | 1,648         | 1,41500 | 0,0199736 |
| 9  | 40,00177 | 30       | 3        | 1,818         | 1,41600 | 0,0151758 |
| 10 | 69,99823 | 30       | 3        | 1,603         | 1,41200 | 0,0126696 |
| 11 | 55       | 20,00174 | 3        | 1,712         | 1,41800 | 0,0142225 |
| 12 | 55       | 39,99826 | 3        | 1,453         | 1,52900 | 0,0166771 |
| 13 | 55       | 30       | 1,000348 | 1,660         | 1,28600 | 0,0178404 |
| 14 | 55       | 30       | 4,999652 | 1,620         | 1,49100 | 0,0173066 |
| 15 | 55       | 30       | 3        | 1,620         | 1,49100 | 0,0173066 |

### Regression Analysis: settling time versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 0,366214 | 0,040690 | 8,54    | 0,002   |
| A           | 1  | 0,004789 | 0,004789 | 1,00    | 0,342   |
| B           | 1  | 0,001085 | 0,001085 | 0,23    | 0,645   |
| C           | 1  | 0,025850 | 0,025850 | 5,42    | 0,045   |
| A*A         | 1  | 0,004483 | 0,004483 | 0,94    | 0,357   |
| B*B         | 1  | 0,010124 | 0,010124 | 2,12    | 0,179   |
| C*C         | 1  | 0,107779 | 0,107779 | 22,61   | 0,001   |
| A*B         | 1  | 0,000032 | 0,000032 | 0,01    | 0,936   |
| A*C         | 1  | 0,000162 | 0,000162 | 0,03    | 0,858   |
| B*C         | 1  | 0,015488 | 0,015488 | 3,25    | 0,105   |
| Error       | 9  | 0,042896 | 0,004766 |         |         |
| Lack-of-Fit | 4  | 0,042896 | 0,010724 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,000000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 18 | 0,409110 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0690377 | 89,51% | 79,03%    | 0,00%      |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | 1,48      | 1,27     | 1,16    | 0,275   |        |
| A        | -0,0302   | 0,0301   | -1,00   | 0,342   | 206,88 |
| B        | 0,0200    | 0,0420   | 0,48    | 0,645   | 178,25 |
| C        | 0,459     | 0,197    | 2,33    | 0,045   | 123,02 |
| A*A      | 0,000227  | 0,000234 | 0,97    | 0,357   | 152,58 |
| B*B      | -0,000769 | 0,000528 | -1,46   | 0,179   | 102,49 |
| C*C      | -0,0801   | 0,0168   | -4,76   | 0,001   | 38,07  |
| A*B      | 0,000038  | 0,000460 | 0,08    | 0,936   | 109,40 |
| A*C      | -0,00042  | 0,00230  | -0,18   | 0,858   | 62,64  |
| B*C      | 0,00622   | 0,00345  | 1,80    | 0,105   | 45,86  |

#### Regression Equation

settling time = 1,48 - 0,0302 A + 0,0200 B + 0,459 C + 0,000227 A\*A - 0,000769 B\*B  
 - 0,0801 C\*C + 0,000038 A\*B - 0,00042 A\*C + 0,00622 B\*C

**Gambar B.1** Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap *settling time* pengendali PID



### Regression Analysis: OS versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 0,144002 | 0,016000 | 2,60    | 0,085   |
| A           | 1  | 0,000020 | 0,000020 | 0,00    | 0,956   |
| B           | 1  | 0,003121 | 0,003121 | 0,51    | 0,494   |
| C           | 1  | 0,014508 | 0,014508 | 2,36    | 0,159   |
| A*A         | 1  | 0,001595 | 0,001595 | 0,26    | 0,623   |
| B*B         | 1  | 0,001440 | 0,001440 | 0,23    | 0,640   |
| C*C         | 1  | 0,001067 | 0,001067 | 0,17    | 0,687   |
| A*B         | 1  | 0,015583 | 0,015583 | 2,54    | 0,146   |
| A*C         | 1  | 0,010290 | 0,010290 | 1,67    | 0,228   |
| B*C         | 1  | 0,034524 | 0,034524 | 5,62    | 0,042   |
| Error       | 9  | 0,055300 | 0,006144 |         |         |
| Lack-of-Fit | 4  | 0,055300 | 0,013825 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,000000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 18 | 0,199302 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0783866 | 72,25% | 44,51%    | 0,00%      |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | 1,68      | 1,44     | 1,16    | 0,274   |        |
| A        | -0,0020   | 0,0342   | -0,06   | 0,956   | 206,88 |
| B        | -0,0339   | 0,0476   | -0,71   | 0,494   | 178,25 |
| C        | 0,344     | 0,224    | 1,54    | 0,159   | 123,02 |
| A*A      | -0,000136 | 0,000266 | -0,51   | 0,623   | 152,58 |
| B*B      | 0,000290  | 0,000599 | 0,48    | 0,640   | 102,49 |
| C*C      | 0,0080    | 0,0191   | 0,42    | 0,687   | 38,07  |
| A*B      | 0,000832  | 0,000523 | 1,59    | 0,146   | 109,40 |
| A*C      | -0,00338  | 0,00261  | -1,29   | 0,228   | 62,64  |
| B*C      | -0,00929  | 0,00392  | -2,37   | 0,042   | 45,86  |

#### Regression Equation

$$\text{OS} = 1,68 - 0,0020 \text{ A} - 0,0339 \text{ B} + 0,344 \text{ C} - 0,000136 \text{ A}^2 + 0,000290 \text{ B}^2 + 0,0080 \text{ C}^2 \\ + 0,000832 \text{ A}^2 \text{ B} - 0,00338 \text{ A}^2 \text{ C} - 0,00929 \text{ B}^2 \text{ C}$$

Gambar B.2 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap persen *overshoot* pengendali PID

### Regression Analysis: RMSE versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 0,000057 | 0,000006 | 8,36    | 0,002   |
| A           | 1  | 0,000005 | 0,000005 | 6,96    | 0,027   |
| B           | 1  | 0,000002 | 0,000002 | 2,96    | 0,120   |
| C           | 1  | 0,000032 | 0,000032 | 42,11   | 0,000   |
| A*A         | 1  | 0,000014 | 0,000014 | 18,10   | 0,002   |
| B*B         | 1  | 0,000003 | 0,000003 | 3,85    | 0,081   |
| C*C         | 1  | 0,000006 | 0,000006 | 8,20    | 0,019   |
| A*B         | 1  | 0,000001 | 0,000001 | 0,84    | 0,384   |
| A*C         | 1  | 0,000026 | 0,000026 | 33,72   | 0,000   |
| B*C         | 1  | 0,000003 | 0,000003 | 4,56    | 0,061   |
| Error       | 9  | 0,000007 | 0,000001 |         |         |
| Lack-of-Fit | 4  | 0,000007 | 0,000002 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,000000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 18 | 0,000064 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0008722 | 89,32% | 78,64%    | 0,00%      |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | 0,0001    | 0,0161   | 0,01    | 0,994   |        |
| A        | 0,001004  | 0,000381 | 2,64    | 0,027   | 206,88 |
| B        | 0,000911  | 0,000530 | 1,72    | 0,120   | 178,25 |
| C        | -0,01616  | 0,00249  | -6,49   | 0,000   | 123,02 |
| A*A      | -0,000013 | 0,000003 | -4,25   | 0,002   | 152,58 |
| B*B      | -0,000013 | 0,000007 | -1,96   | 0,081   | 102,49 |
| C*C      | 0,000609  | 0,000213 | 2,86    | 0,019   | 38,07  |
| A*B      | -0,000005 | 0,000006 | -0,92   | 0,384   | 109,40 |
| A*C      | 0,000169  | 0,000029 | 5,81    | 0,000   | 62,64  |
| B*C      | 0,000093  | 0,000044 | 2,14    | 0,061   | 45,86  |

#### Regression Equation

$$\text{RMSE} = 0,0001 + 0,001004 A + 0,000911 B - 0,01616 C - 0,000013 A*A - 0,000013 B*B + 0,000609 C*C - 0,000005 A*B + 0,000169 A*C + 0,000093 B*C$$

Gambar B.3 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap RMSE pengendali PID

## B.2 Analisis Regresi Gerakan Elevasi untuk pengendali PID

Tabel B.2 Hasil pengambilan data untuk gerakan elevasi pengendali PID

| No | A       | B       | C        | <i>Settling time</i> | %OS     | RMSE      |
|----|---------|---------|----------|----------------------|---------|-----------|
| 1  | 23,852  | 24,055  | 6,014    | 2,041                | 1,18452 | 0,0123847 |
| 2  | 35,148  | 24,055  | 6,014    | 2,150                | 1,10556 | 0,0093172 |
| 3  | 23,852  | 35,945  | 6,014    | 1,778                | 1,21341 | 0,0121659 |
| 4  | 35,148  | 35,945  | 6,014    | 1,812                | 1,14368 | 0,0141662 |
| 5  | 23,852  | 24,055  | 8,986    | 2,662                | 1,29167 | 0,0101789 |
| 6  | 35,148  | 24,055  | 8,986    | 2,721                | 1,14368 | 0,0142780 |
| 7  | 23,852  | 35,945  | 8,986    | 2,003                | 1,24375 | 0,0124740 |
| 8  | 35,148  | 35,945  | 8,986    | 2,229                | 1,09943 | 0,0129630 |
| 9  | 20,0012 | 30      | 7,5      | 2,630                | 1,11798 | 0,0117456 |
| 10 | 38,9987 | 30      | 7,5      | 1,958                | 1,17059 | 0,0140602 |
| 11 | 29,5    | 20,0017 | 7,5      | 1,788                | 1,17059 | 0,0135093 |
| 12 | 29,5    | 39,9983 | 7,5      | 2,200                | 1,14368 | 0,0133124 |
| 13 | 29,5    | 30      | 5,000856 | 2,041                | 1,18452 | 0,0123847 |
| 14 | 29,5    | 30      | 9,999144 | 2,150                | 1,10556 | 0,0093172 |
| 15 | 29,5    | 30      | 7,5      | 1,778                | 1,21341 | 0,0121659 |

### Regression Analysis: time respon versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS  | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|---------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 1,27197 | 0,141330 | 86,71   | 0,000   |
| A           | 1  | 0,00915 | 0,009145 | 5,61    | 0,050   |
| B           | 1  | 0,00067 | 0,000674 | 0,41    | 0,541   |
| C           | 1  | 0,06126 | 0,061259 | 37,59   | 0,000   |
| A*A         | 1  | 0,00162 | 0,001617 | 0,99    | 0,352   |
| B*B         | 1  | 0,00892 | 0,008918 | 5,47    | 0,052   |
| C*C         | 1  | 0,00883 | 0,008832 | 5,42    | 0,053   |
| A*B         | 1  | 0,00429 | 0,004286 | 2,63    | 0,149   |
| A*C         | 1  | 0,00270 | 0,002696 | 1,65    | 0,239   |
| B*C         | 1  | 0,03279 | 0,032791 | 20,12   | 0,003   |
| Error       | 7  | 0,01141 | 0,001630 |         |         |
| Lack-of-Fit | 2  | 0,01141 | 0,005705 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,00000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 16 | 1,28338 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0403715 | 99,11% | 97,97%    | 0,00%      |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | -2,121    | 0,846    | -2,51   | 0,041   |        |
| A        | 0,0815    | 0,0344   | 2,37    | 0,050   | 218,08 |
| B        | 0,0166    | 0,0258   | 0,64    | 0,541   | 181,40 |
| C        | 0,761     | 0,124    | 6,13    | 0,000   | 196,14 |
| A*A      | -0,000501 | 0,000503 | -1,00   | 0,352   | 177,80 |
| B*B      | 0,000732  | 0,000313 | 2,34    | 0,052   | 96,99  |
| C*C      | -0,01693  | 0,00727  | -2,33   | 0,053   | 139,69 |
| A*B      | -0,000900 | 0,000555 | -1,62   | 0,149   | 138,47 |
| A*C      | -0,00285  | 0,00222  | -1,29   | 0,239   | 123,15 |
| B*C      | -0,00946  | 0,00211  | -4,49   | 0,003   | 103,45 |

#### Regression Equation

time respon = -2,121 + 0,0815 A + 0,0166 B + 0,761 C - 0,000501 A\*A + 0,000732 B\*B  
 - 0,01693 C\*C - 0,000900 A\*B - 0,00285 A\*C - 0,00946 B\*C

Gambar B.4 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap *settling time* pengendali PID

### Regression Analysis: OS versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 0,037521 | 0,004169 | 29,36   | 0,000   |
| A           | 1  | 0,001986 | 0,001986 | 13,99   | 0,007   |
| B           | 1  | 0,000532 | 0,000532 | 3,74    | 0,094   |
| C           | 1  | 0,006375 | 0,006375 | 44,89   | 0,000   |
| A*A         | 1  | 0,002166 | 0,002166 | 15,25   | 0,006   |
| B*B         | 1  | 0,000049 | 0,000049 | 0,34    | 0,577   |
| C*C         | 1  | 0,011207 | 0,011207 | 78,92   | 0,000   |
| A*B         | 1  | 0,000213 | 0,000213 | 1,50    | 0,260   |
| A*C         | 1  | 0,000773 | 0,000773 | 5,44    | 0,052   |
| B*C         | 1  | 0,000574 | 0,000574 | 4,04    | 0,084   |
| Error       | 7  | 0,000994 | 0,000142 |         |         |
| Lack-of-Fit | 2  | 0,000994 | 0,000497 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,000000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 16 | 0,038515 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0119170 | 97,42% | 94,10%    | 0,00%      |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | 2,799     | 0,250    | 11,21   | 0,000   |        |
| A        | -0,0380   | 0,0102   | -3,74   | 0,007   | 218,08 |
| B        | -0,01472  | 0,00761  | -1,93   | 0,094   | 181,40 |
| C        | -0,2454   | 0,0366   | -6,70   | 0,000   | 196,14 |
| A*A      | 0,000580  | 0,000149 | 3,91    | 0,006   | 177,80 |
| B*B      | 0,000054  | 0,000092 | 0,58    | 0,577   | 96,99  |
| C*C      | 0,01907   | 0,00215  | 8,88    | 0,000   | 139,69 |
| A*B      | 0,000201  | 0,000164 | 1,23    | 0,260   | 138,47 |
| A*C      | -0,001528 | 0,000655 | -2,33   | 0,052   | 123,15 |
| B*C      | 0,001251  | 0,000622 | 2,01    | 0,084   | 103,45 |

#### Regression Equation

$$OS = 2,799 - 0,0380 A - 0,01472 B - 0,2454 C + 0,000580 A*A + 0,000054 B*B + 0,01907 C*C + 0,000201 A*B - 0,001528 A*C + 0,001251 B*C$$

Gambar B.5 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap persen *overshoot* pengendali PID

### Regression Analysis: RMSE versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 0,000024 | 0,000003 | 4,55    | 0,029   |
| A           | 1  | 0,000000 | 0,000000 | 0,00    | 0,971   |
| B           | 1  | 0,000001 | 0,000001 | 2,17    | 0,184   |
| C           | 1  | 0,000001 | 0,000001 | 1,10    | 0,328   |
| A*A         | 1  | 0,000007 | 0,000007 | 11,72   | 0,011   |
| B*B         | 1  | 0,000001 | 0,000001 | 1,16    | 0,318   |
| C*C         | 1  | 0,000002 | 0,000002 | 2,98    | 0,128   |
| A*B         | 1  | 0,000004 | 0,000004 | 6,95    | 0,034   |
| A*C         | 1  | 0,000010 | 0,000010 | 16,91   | 0,005   |
| B*C         | 1  | 0,000008 | 0,000008 | 14,07   | 0,007   |
| Error       | 7  | 0,000004 | 0,000001 |         |         |
| Lack-of-Fit | 2  | 0,000004 | 0,000002 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,000000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 16 | 0,000029 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0007710 | 85,41% | 66,65%    | 0,00%      |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | -0,0092   | 0,0162   | -0,57   | 0,587   |        |
| A        | 0,000025  | 0,000657 | 0,04    | 0,971   | 218,08 |
| B        | 0,000725  | 0,000492 | 1,47    | 0,184   | 181,40 |
| C        | 0,00249   | 0,00237  | 1,05    | 0,328   | 196,14 |
| A*A      | -0,000033 | 0,000010 | -3,42   | 0,011   | 177,80 |
| B*B      | -0,000006 | 0,000006 | -1,07   | 0,318   | 96,99  |
| C*C      | -0,000240 | 0,000139 | -1,73   | 0,128   | 139,69 |
| A*B      | 0,000028  | 0,000011 | 2,64    | 0,034   | 138,47 |
| A*C      | 0,000174  | 0,000042 | 4,11    | 0,005   | 123,15 |
| B*C      | -0,000151 | 0,000040 | -3,75   | 0,007   | 103,45 |

#### Regression Equation

$$\text{RMSE} = -0,0092 + 0,000025 A + 0,000725 B + 0,00249 C - 0,000033 A*A - 0,000006 B*B - 0,000240 C*C + 0,000028 A*B + 0,000174 A*C - 0,000151 B*C$$

Gambar B.6 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap RMSE pengendali PID

### B.3 Analisis Regresi Gerakan Azimut untuk Pengendali ODSPW PID

Tabel B.3 Hasil pengambilan data untuk gerakan azimut pengendali ODSPW PID

| No | A        | B        | C        | Settling Time | %OS    | RMSE      |
|----|----------|----------|----------|---------------|--------|-----------|
| 1  | 46,082   | 24,055   | 1,811    | 4,791         | 1,0090 | 0,0119616 |
| 2  | 63,918   | 24,055   | 1,811    | 6,752         | 1,0000 | 0,0176918 |
| 3  | 46,082   | 35,945   | 1,811    | 3,162         | 1,0110 | 0,0783230 |
| 4  | 63,918   | 35,945   | 1,811    | 4,105         | 0,9984 | 0,0023022 |
| 5  | 46,082   | 24,055   | 4,189    | 4,352         | 0,9978 | 0,0025505 |
| 6  | 63,918   | 24,055   | 4,189    | 6,039         | 0,9892 | 0,0119501 |
| 7  | 46,082   | 35,945   | 4,189    | 2,920         | 1,0280 | 0,0112969 |
| 8  | 63,918   | 35,945   | 4,189    | 4,056         | 0,9985 | 0,0039000 |
| 9  | 40,00177 | 30       | 3        | 3,163         | 1,0130 | 0,0111803 |
| 10 | 69,99823 | 30       | 3        | 5,805         | 1,0050 | 0,0140207 |
| 11 | 55       | 20,00174 | 3        | 6,270         | 0,9875 | 0,0146501 |
| 12 | 55       | 39,99826 | 3        | 3,153         | 0,9980 | 0,0004528 |
| 13 | 55       | 30       | 1,000348 | 4,256         | 0,9980 | 0,0033534 |
| 14 | 55       | 30       | 4,999652 | 4,181         | 0,9983 | 0,0021000 |
| 15 | 55       | 30       | 3        | 4,480         | 1,0090 | 0,0099058 |

### Regression Analysis: settling time versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS  | Adj MS  | F-Value | P-Value |
|-------------|----|---------|---------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 20,6488 | 2,29432 | 165,64  | 0,000   |
| A           | 1  | 0,1772  | 0,17719 | 12,79   | 0,005   |
| B           | 1  | 0,0703  | 0,07027 | 5,07    | 0,048   |
| C           | 1  | 0,0034  | 0,00345 | 0,25    | 0,629   |
| A*A         | 1  | 0,0022  | 0,00216 | 0,16    | 0,701   |
| B*B         | 1  | 0,1238  | 0,12378 | 8,94    | 0,014   |
| C*C         | 1  | 0,0960  | 0,09602 | 6,93    | 0,025   |
| A*B         | 1  | 0,3077  | 0,30772 | 22,22   | 0,001   |
| A*C         | 1  | 0,0008  | 0,00082 | 0,06    | 0,813   |
| B*C         | 1  | 0,0927  | 0,09267 | 6,69    | 0,027   |
| Error       | 10 | 0,1385  | 0,01385 |         |         |
| Lack-of-Fit | 5  | 0,1385  | 0,02770 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,0000  | 0,00000 |         |         |
| Total       | 19 | 20,7874 |         |         |         |

#### Model Summary

| S        | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|----------|--------|-----------|------------|
| 0,117692 | 99,33% | 98,73%    | 94,73%     |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | 2,37      | 2,16     | 1,10    | 0,298   |        |
| A        | 0,1804    | 0,0504   | 3,58    | 0,005   | 199,52 |
| B        | -0,1588   | 0,0705   | -2,25   | 0,048   | 173,33 |
| C        | -0,154    | 0,310    | -0,50   | 0,629   | 133,53 |
| A*A      | 0,000154  | 0,000390 | 0,39    | 0,701   | 145,20 |
| B*B      | 0,002622  | 0,000877 | 2,99    | 0,014   | 97,54  |
| C*C      | -0,0577   | 0,0219   | -2,63   | 0,025   | 25,15  |
| A*B      | -0,003699 | 0,000785 | -4,71   | 0,001   | 109,40 |
| A*C      | -0,00095  | 0,00392  | -0,24   | 0,813   | 76,80  |
| B*C      | 0,01523   | 0,00589  | 2,59    | 0,027   | 55,34  |

#### Regression Equation

settling time = 2,37 + 0,1804 A - 0,1588 B - 0,154 C + 0,000154 A\*A + 0,002622 B\*B  
 - 0,0577 C\*C - 0,003699 A\*B - 0,00095 A\*C + 0,01523 B\*C

**Gambar B.7** Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap *settling time* pengendali ODSPW PID



### Regression Analysis: peak versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 0,001389 | 0,000154 | 7,61    | 0,002   |
| A           | 1  | 0,000001 | 0,000001 | 0,04    | 0,847   |
| B           | 1  | 0,000274 | 0,000274 | 13,53   | 0,004   |
| C           | 1  | 0,000001 | 0,000001 | 0,03    | 0,878   |
| A*A         | 1  | 0,000013 | 0,000013 | 0,66    | 0,435   |
| B*B         | 1  | 0,000329 | 0,000329 | 16,24   | 0,002   |
| C*C         | 1  | 0,000119 | 0,000119 | 5,86    | 0,036   |
| A*B         | 1  | 0,000075 | 0,000075 | 3,70    | 0,083   |
| A*C         | 1  | 0,000034 | 0,000034 | 1,68    | 0,224   |
| B*C         | 1  | 0,000191 | 0,000191 | 9,42    | 0,012   |
| Error       | 10 | 0,000203 | 0,000020 |         |         |
| Lack-of-Fit | 5  | 0,000203 | 0,000041 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,000000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 19 | 0,001592 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0045044 | 87,26% | 75,79%    | 0,00%      |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | 0,8529    | 0,0826   | 10,33   | 0,000   |        |
| A        | 0,00038   | 0,00193  | 0,20    | 0,847   | 199,52 |
| B        | 0,00993   | 0,00270  | 3,68    | 0,004   | 173,33 |
| C        | 0,0019    | 0,0118   | 0,16    | 0,878   | 133,53 |
| A*A      | 0,000012  | 0,000015 | 0,81    | 0,435   | 145,20 |
| B*B      | -0,000135 | 0,000034 | -4,03   | 0,002   | 97,54  |
| C*C      | -0,002031 | 0,000839 | -2,42   | 0,036   | 25,15  |
| A*B      | -0,000058 | 0,000030 | -1,92   | 0,083   | 109,40 |
| A*C      | -0,000195 | 0,000150 | -1,30   | 0,224   | 76,80  |
| B*C      | 0,000691  | 0,000225 | 3,07    | 0,012   | 55,34  |

#### Regression Equation

$$\text{peak} = 0,8529 + 0,00038 A + 0,00993 B + 0,0019 C + 0,000012 A*A - 0,000135 B*B - 0,002031 C*C - 0,000058 A*B - 0,000195 A*C + 0,000691 B*C$$

Gambar B.8 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap persen *overshoot* pengendali ODSPW PID

**Regression Analysis: RMSE versus A; B; C**

## Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 0,003195 | 0,000355 | 1,94    | 0,158   |
| A           | 1  | 0,000001 | 0,000001 | 0,00    | 0,953   |
| B           | 1  | 0,000516 | 0,000516 | 2,82    | 0,124   |
| C           | 1  | 0,000080 | 0,000080 | 0,44    | 0,524   |
| A*A         | 1  | 0,000135 | 0,000135 | 0,74    | 0,410   |
| B*B         | 1  | 0,000024 | 0,000024 | 0,13    | 0,727   |
| C*C         | 1  | 0,000003 | 0,000003 | 0,01    | 0,907   |
| A*B         | 1  | 0,001214 | 0,001214 | 6,64    | 0,028   |
| A*C         | 1  | 0,000653 | 0,000653 | 3,57    | 0,088   |
| B*C         | 1  | 0,000316 | 0,000316 | 1,73    | 0,218   |
| Error       | 10 | 0,001829 | 0,000183 |         |         |
| Lack-of-Fit | 5  | 0,001829 | 0,000366 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,000000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 19 | 0,005023 |          |         |         |

## Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0135227 | 63,60% | 30,84%    | 0,00%      |

## Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | -0,133    | 0,248    | -0,54   | 0,603   |        |
| A        | -0,00035  | 0,00580  | -0,06   | 0,953   | 199,52 |
| B        | 0,01362   | 0,00810  | 1,68    | 0,124   | 173,33 |
| C        | -0,0235   | 0,0356   | -0,66   | 0,524   | 133,53 |
| A*A      | 0,000039  | 0,000045 | 0,86    | 0,410   | 145,20 |
| B*B      | 0,000036  | 0,000101 | 0,36    | 0,727   | 97,54  |
| C*C      | -0,00030  | 0,00252  | -0,12   | 0,907   | 25,15  |
| A*B      | -0,000232 | 0,000090 | -2,58   | 0,028   | 109,40 |
| A*C      | 0,000852  | 0,000451 | 1,89    | 0,088   | 76,80  |
| B*C      | -0,000889 | 0,000676 | -1,31   | 0,218   | 55,34  |

## Regression Equation

$$\text{RMSE} = -0,133 - 0,00035 A + 0,01362 B - 0,0235 C + 0,000039 A*A + 0,000036 B*B - 0,00030 C*C - 0,000232 A*B + 0,000852 A*C - 0,000889 B*C$$

**Gambar B.9 Hasil analisis regresi gerakan azimuth terhadap RMSE pengendali ODSPW PID**

## B.4 Analisis Regresi Gerakan Elevasi untuk pengendali ODSPW PID

Tabel B.4 Hasil pengambilan data untuk gerakan elevasi pengendali ODSPW PID

| No | A       | B        | C       | <i>Settling time</i> | %OS   | RMSE     |
|----|---------|----------|---------|----------------------|-------|----------|
| 1  | 23,852  | 24,055   | 6,014   | 1,634                | 8,180 | 0,113217 |
| 2  | 35,148  | 24,055   | 6,014   | 2,986                | 8,173 | 0,111732 |
| 3  | 23,852  | 35,945   | 6,014   | 0,957                | 8,277 | 0,106794 |
| 4  | 35,148  | 35,945   | 6,014   | 1,838                | 8,177 | 0,107490 |
| 5  | 23,852  | 24,055   | 8,986   | 1,462                | 8,183 | 0,004243 |
| 6  | 35,148  | 24,055   | 8,986   | 2,739                | 8,182 | 0,188733 |
| 7  | 23,852  | 35,945   | 8,986   | 1,015                | 8,554 | 0,110309 |
| 8  | 35,148  | 35,945   | 8,986   | 1,595                | 8,180 | 0,127201 |
| 9  | 20,0012 | 30       | 7,5     | 1,008                | 8,617 | 0,108904 |
| 10 | 38,9988 | 30       | 7,5     | 2,528                | 8,177 | 0,127801 |
| 11 | 29,5    | 20,00174 | 7,5     | 2,767                | 8,179 | 0,196825 |
| 12 | 29,5    | 39,99826 | 7,5     | 1,089                | 8,177 | 0,003606 |
| 13 | 29,5    | 30       | 5,00086 | 1,829                | 8,180 | 0,112450 |
| 14 | 29,5    | 30       | 9,99914 | 1,478                | 8,191 | 0,003606 |
| 15 | 29,5    | 30       | 7,5     | 1,610                | 8,184 | 0,122287 |

### Regression Analysis: time respon versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS  | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|---------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 6,58064 | 0,731182 | 188,97  | 0,000   |
| A           | 1  | 0,05924 | 0,059239 | 15,31   | 0,003   |
| B           | 1  | 0,06484 | 0,064835 | 16,76   | 0,002   |
| C           | 1  | 0,00091 | 0,000913 | 0,24    | 0,638   |
| A*A         | 1  | 0,03988 | 0,039884 | 10,31   | 0,009   |
| B*B         | 1  | 0,17177 | 0,171773 | 44,39   | 0,000   |
| C*C         | 1  | 0,00212 | 0,002119 | 0,55    | 0,476   |
| A*B         | 1  | 0,17053 | 0,170528 | 44,07   | 0,000   |
| A*C         | 1  | 0,01767 | 0,017672 | 4,57    | 0,058   |
| B*C         | 1  | 0,00684 | 0,006844 | 1,77    | 0,213   |
| Error       | 10 | 0,03869 | 0,003869 |         |         |
| Lack-of-Fit | 5  | 0,03869 | 0,007739 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,00000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 19 | 6,61933 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0622036 | 99,42% | 98,89%    | 95,41%     |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | 2,00      | 1,28     | 1,56    | 0,149   |        |
| A        | 0,1613    | 0,0412   | 3,91    | 0,003   | 191,37 |
| B        | -0,1587   | 0,0388   | -4,09   | 0,002   | 187,58 |
| C        | -0,075    | 0,155    | -0,49   | 0,638   | 187,60 |
| A*A      | 0,001649  | 0,000514 | 3,21    | 0,009   | 104,43 |
| B*B      | 0,003089  | 0,000464 | 6,66    | 0,000   | 97,54  |
| C*C      | 0,00549   | 0,00742  | 0,74    | 0,476   | 97,58  |
| A*B      | -0,004348 | 0,000655 | -6,64   | 0,000   | 91,04  |
| A*C      | -0,00560  | 0,00262  | -2,14   | 0,058   | 91,06  |
| B*C      | 0,00331   | 0,00249  | 1,33    | 0,213   | 87,96  |

#### Regression Equation

time respon = 2,00 + 0,1613 A - 0,1587 B - 0,075 C + 0,001649 A\*A + 0,003089 B\*B  
+ 0,00549 C\*C - 0,004348 A\*B - 0,00560 A\*C + 0,00331 B\*C

Gambar B.10 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap *settling time* pengendali ODSPW PID

### Regression Analysis: %OS versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 0,003975 | 0,000442 | 6,60    | 0,003   |
| A           | 1  | 0,000153 | 0,000153 | 2,28    | 0,162   |
| B           | 1  | 0,000061 | 0,000061 | 0,92    | 0,361   |
| C           | 1  | 0,000005 | 0,000005 | 0,07    | 0,795   |
| A*A         | 1  | 0,001141 | 0,001141 | 17,05   | 0,002   |
| B*B         | 1  | 0,000009 | 0,000009 | 0,13    | 0,725   |
| C*C         | 1  | 0,000003 | 0,000003 | 0,04    | 0,840   |
| A*B         | 1  | 0,000424 | 0,000424 | 6,34    | 0,031   |
| A*C         | 1  | 0,000140 | 0,000140 | 2,10    | 0,178   |
| B*C         | 1  | 0,000140 | 0,000140 | 2,10    | 0,178   |
| Error       | 10 | 0,000669 | 0,000067 |         |         |
| Lack-of-Fit | 5  | 0,000669 | 0,000134 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,000000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 19 | 0,004644 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0081814 | 85,59% | 72,62%    | 0,00%      |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | 1,062     | 0,168    | 6,32    | 0,000   |        |
| A        | -0,00819  | 0,00542  | -1,51   | 0,162   | 191,37 |
| B        | 0,00488   | 0,00510  | 0,96    | 0,361   | 187,58 |
| C        | 0,0054    | 0,0204   | 0,27    | 0,795   | 187,60 |
| A*A      | 0,000279  | 0,000068 | 4,13    | 0,002   | 104,43 |
| B*B      | -0,000022 | 0,000061 | -0,36   | 0,725   | 97,54  |
| C*C      | -0,000203 | 0,000976 | -0,21   | 0,840   | 97,58  |
| A*B      | -0,000217 | 0,000086 | -2,52   | 0,031   | 91,04  |
| A*C      | -0,000499 | 0,000345 | -1,45   | 0,178   | 91,06  |
| B*C      | 0,000474  | 0,000327 | 1,45    | 0,178   | 87,96  |

#### Regression Equation

$$\%OS = 1,062 - 0,00819 A + 0,00488 B + 0,0054 C + 0,000279 A*A - 0,000022 B*B - 0,000203 C*C - 0,000217 A*B - 0,000499 A*C + 0,000474 B*C$$

Gambar B.11 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap persen *overshoot* pengendali ODSPW PID

### Regression Analysis: RMSE versus A; B; C

#### Analysis of Variance

| Source      | DF | Adj SS   | Adj MS   | F-Value | P-Value |
|-------------|----|----------|----------|---------|---------|
| Regression  | 9  | 0,027246 | 0,003027 | 1,39    | 0,307   |
| A           | 1  | 0,000073 | 0,000073 | 0,03    | 0,858   |
| B           | 1  | 0,000610 | 0,000610 | 0,28    | 0,608   |
| C           | 1  | 0,000006 | 0,000006 | 0,00    | 0,958   |
| A*A         | 1  | 0,000089 | 0,000089 | 0,04    | 0,844   |
| B*B         | 1  | 0,000223 | 0,000223 | 0,10    | 0,756   |
| C*C         | 1  | 0,005120 | 0,005120 | 2,35    | 0,156   |
| A*B         | 1  | 0,003420 | 0,003420 | 1,57    | 0,239   |
| A*C         | 1  | 0,005109 | 0,005109 | 2,35    | 0,157   |
| B*C         | 1  | 0,000381 | 0,000381 | 0,17    | 0,685   |
| Error       | 10 | 0,021777 | 0,002178 |         |         |
| Lack-of-Fit | 5  | 0,021777 | 0,004355 | *       | *       |
| Pure Error  | 5  | 0,000000 | 0,000000 |         |         |
| Total       | 19 | 0,049023 |          |         |         |

#### Model Summary

| S         | R-sq   | R-sq(adj) | R-sq(pred) |
|-----------|--------|-----------|------------|
| 0,0466660 | 55,58% | 15,60%    | 0,00%      |

#### Coefficients

| Term     | Coef      | SE Coef  | T-Value | P-Value | VIF    |
|----------|-----------|----------|---------|---------|--------|
| Constant | -0,004    | 0,958    | -0,00   | 0,996   |        |
| A        | -0,0057   | 0,0309   | -0,18   | 0,858   | 191,37 |
| B        | 0,0154    | 0,0291   | 0,53    | 0,608   | 187,58 |
| C        | 0,006     | 0,116    | 0,05    | 0,958   | 187,60 |
| A*A      | 0,000078  | 0,000385 | 0,20    | 0,844   | 104,43 |
| B*B      | -0,000111 | 0,000348 | -0,32   | 0,756   | 97,54  |
| C*C      | -0,00854  | 0,00557  | -1,53   | 0,156   | 97,58  |
| A*B      | -0,000616 | 0,000491 | -1,25   | 0,239   | 91,04  |
| A*C      | 0,00301   | 0,00197  | 1,53    | 0,157   | 91,06  |
| B*C      | 0,00078   | 0,00187  | 0,42    | 0,685   | 87,96  |

#### Regression Equation

$$\text{RMSE} = -0,004 - 0,0057 A + 0,0154 B + 0,006 C + 0,000078 A*A - 0,000111 B*B - 0,00854 C*C - 0,000616 A*B + 0,00301 A*C + 0,00078 B*C$$

Gambar B.12 Hasil analisis regresi gerakan elevasi terhadap RMSE pengendali ODSPW PID


### B.5 Optimasi GRG Non-linier

Optimasi GRG Non-linier dilakukan dengan menggunakan Microsoft Excel. Mula-mula, persamaan dan batasan – batasan yang dimiliki dimasukkan ke dalam kolom sesuai gambar B.7. Kemudian, pilih **Data > Solver** untuk membuka kotak dialog. Pilih metode penyelesaian GRG Non-linier. Gambar B.8 menunjukkan parameter *Solver* yang harus diisi. *Set objective* berisikan persamaan tujuan dan *To* menunjukkan tujuan yang diinginkan. *Variable cells* berisikan sel variabel. *Constraints* berisikan persamaan batasan. Pada optimasi ini digunakan nilai maksimum dan minimum dari parameter sebagai persamaan batasan. Hal ini diulang untuk tiap pengendali.


|    | A       | B        | C   | D   | E | F            | G        | H         | I          | J                | K |
|----|---------|----------|-----|-----|---|--------------|----------|-----------|------------|------------------|---|
| 1  | elevasi |          |     |     |   |              |          |           |            |                  |   |
| 2  |         |          | min | max |   |              |          | nilai max | nilai min  |                  |   |
| 3  | Kp      | 34,98213 | 20  | 39  |   | time respond | 1,785968 |           |            | 0 fungsi minimum |   |
| 4  | Ki      | 38,66332 | 20  | 40  |   | overshoot    | 1,150001 | 1,15      | 0,8        |                  |   |
| 5  | Kd      | 5,857146 | 5   | 10  |   | bandwidth    | 0,016031 | 0,05      | 0 5 persen |                  |   |
| 6  |         |          |     |     |   |              |          |           |            |                  |   |
| 7  |         |          |     |     |   |              |          |           |            |                  |   |
| 8  |         |          |     |     |   |              |          |           |            |                  |   |
| 9  |         |          |     |     |   |              |          |           |            |                  |   |
| 10 | azimuth |          |     |     |   |              |          |           |            |                  |   |
| 11 |         |          | min | max |   |              |          | nilai max | nilai min  |                  |   |
| 12 | Kp      | 37,98635 | 30  | 70  |   | time respond | 1,744433 |           |            | 0 fungsi minimum |   |
| 13 | Ki      | 40       | 20  | 40  |   | overshoot    | 1,200001 | 1,2       | 0,8        |                  |   |
| 14 | Kd      | 5        | 1   | 5   |   | bandwidth    | 0,012646 | 0,05      | 0 5 persen |                  |   |

Gambar B.13 Susunan Excel

Solver Parameters ×

Set Objective:  

To: ☐ Max ☒ Min ☐ Value Of:

By Changing Variable Cells:  

Subject to the Constraints:

\$B\$12:\$B\$14 <= \$D\$12:\$D\$14

\$B\$12:\$B\$14 >= \$C\$12:\$C\$14

\$G\$12:\$G\$14 >= \$I\$12:\$I\$14

\$G\$13:\$G\$14 <= \$H\$13:\$H\$14

Add


Change

Delete

Reset All

Load/Save

☒ Make Unconstrained Variables Non-Negative

Select a Solving Method:   Options

**Solving Method**

Select the GRG Nonlinear engine for Solver Problems that are smooth nonlinear. Select the LP Simplex engine for linear Solver Problems, and select the Evolutionary engine for Solver problems that are non-smooth.

Help
Solve
Close

Gambar B.14 Parameter *Solver* GRG Non-linier



## LAMPIRAN C KODE MATLAB

### C.1 Kode untuk Model Kinematik, Model Dinamik, dan *State Space*

```
clear;
clc;
syms d1 d2 a1 a2 teta1 alpha1 teta2 alpha2;
%input
%m1 m2 d1 d2 alpha1 alpha2 a1 a2 g inertia
m1 = sym(67.24,'d');
m2 = sym(9.80,'d');
d1 = sym(0.389,'d');
d2 = sym(0,'d');
a1 = sym(0.0975,'d');
a2 = sym(1.07578,'d');
g = sym([0,0,9.8],'d');
alpha1 = sym(deg2rad(270),'d');
alpha2 = sym(deg2rad(0),'d');

%inertia diambil dari "inertia at center of mass"
i1 = sym([1 -0.02 -0.01; -0.022 -0.63 0.78; 0.01 0.78 -0.63],'d');
i2 = sym([0 0 1; -0.07 -1 0; 1 -0.07 0],'d');

%transformation matrix
T11 = [1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 d1; 0 0 0 1];
T12 = [cos(teta1) -sin(teta1) 0 0; sin(teta1) cos(teta1) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
T13 = [1 0 0 a1; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
T14 = [1 0 0 0; 0 cos(alpha1) -sin(alpha1) 0; 0 sin(alpha1) cos(alpha1) 0; 0 0 0 1];

T21 = [1 0 0 0; 0 1 0 0; 0 0 1 d2; 0 0 0 1];
T22 = [cos(teta2) -sin(teta2) 0 0; sin(teta2) cos(teta2) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
T23 = [1 0 0 a2; 0 1 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
T24 = [1 0 0 0; 0 cos(alpha2) -sin(alpha2) 0; 0 sin(alpha2) cos(alpha2) 0; 0 0 0 1];

A1 = T11*T12*T13*T14;
A2 = T21*T22*T23*T24;

TDH = A1*A2;

syms teta psi px py pz;
T31 = [cos(teta) -sin(teta) 0 0; sin(teta) cos(teta) 0 0; 0 0 1 0; 0 0 0 1];
```

```
T32 = [cos(psi) 0 -sin(psi) 0 ; 0 1 0 0; sin(psi) 0 cos(psi) 0; 0 0 0 1];
```

```
Arot = T31*T32;
px = (a1+(a2*cos(psi)))*cos(teta);
py = (a1+(a2*cos(psi)))*sin(teta);
pz = d1 +a2*sin(teta);
Apos = [1 0 0 px; 0 1 0 py; 0 0 1 pz; 0 0 0 0];
```

```
TEE = Apos *Arot;
```

```
sol2 = solve(sin(alpha1)*sin(teta2) == sin(psi), teta2);
sol1 = solve(cos(teta1)*cos(teta2) - cos(alpha1)*sin(teta1)*sin(teta2) ==
cos(psi)*cos(teta), teta1) ;
```

```
%menentukan matrix Rotasi
```

```
R01= A1(1:3,1:3);
R12= A2(1:3,1:3);
R02= TDH(1:3,1:3);
```

```
%menentukan matrix Z
```

```
Z0= [0;0;1];
Z1= R01*[0;0;1];
```

```
%menentukan matrix Posisi
```

```
P01= ([1]*[a1*cos(teta1); a1*sin(teta1); 0])/2;
P12= (R01*[a2*cos(teta2); a2*sin(teta2); 0])/2;
P02= ([1]*[a1*cos(teta1); a1*sin(teta1); 0])+ P12;
```

```
%transpose matrix%
```

```
R01trans = transpose(R01);
R02trans = transpose(R02);
```

```
%hasil inertia
```

```
I1 = R01*i1*R01trans;
I2 = R02*i2*R02trans;
```

```
%jacobian (Jvij)
```

```
Jv11 = cross(Z0,P01);
Jv1 = [Jv11 zeros(size(Jv11,1),1)];
Jv21 = cross(Z0,P02);
Jv22 = cross(Z1,P12);
Jv2 = [Jv21, Jv22];
Jw1 = [0 0;0 0;1 0];
Jw2 = [Z0, Z1];
```

```
%Manipulator inertia matrix
```

```
M=(transpose(Jv1)*m1*Jv1 + transpose(Jw1)*I1*Jw1 + transpose(Jv2)*m2*Jv2 +
transpose(Jw2)*I2*Jw2);
```

```
%Velocity coupling vector
```

```
syms tetadot1 tetadot2
```

```
tetadot = [tetadot1;tetadot2];
```

```
teta = [teta1;teta2];
```

```
for j = 1:1:2;
```

```
    for k = 1:1:2;
```

```
        hasilv1(j,k) = (diff(M(1,j),teta(k))-
```

```
(0.5.*(diff(M(j,k),teta(1))))).*tetadot(j).*tetadot(k);
```

```
    end
```

```
end
```

```
V1 = hasilv1(1,1) + hasilv1(1,2) + hasilv1(2,1) + hasilv1(2,2);
```

```
for j = 1:1:2;
```

```
    for k = 1:1:2;
```

```
        hasilv2(j,k) = (diff(M(2,j),teta(k))-
```

```
(0.5.*(diff(M(j,k),teta(2))))).*tetadot(j).*tetadot(k);
```

```
    end
```

```
end
```

```
V2 = hasilv2(1,1) + hasilv2(1,2) + hasilv2(2,1) + hasilv2(2,2);
```

```
%Gravitational vector
```

```
syms Jv m
```

```
Jv = [Jv1, Jv2];
```

```
m = [m1;m2];
```

```
G1 = ((m1*g*Jv11)+(m2*g*Jv21));
```

```
G2 = m2*g*Jv22;
```

```
%Lagrange's equation of motion
```

```
%assumption: no external force and joint friction is negligible
```

```
syms tetadotdot tetadotdot1 tetadotdot2
```

```
tetadotdot=[tetadotdot1;tetadotdot2];
```

```
for j=1:1:2
```

```
    sblmtorsi1(j)=M(1,j)*tetadotdot(j);
```

```
end
```

```
sigmasblmtorsi1 = sblmtorsi1(1)+sblmtorsi1(2);
```

```
torsi1matrix = sigmasblmtorsi1 + V1 +G1;
```

```

for j=1:1:2
    sblmtorsi2(j)=M(2,j)*tetadotdot(j);
end
sigmasblmtorsi2 = sblmtorsi2(1)+sblmtorsi2(2);
torsi2matrix = sigmasblmtorsi2 + V2 +G2;

%memanggil persamaan torsi
torsi1 = torsi1matrix;
torsi2 = torsi2matrix;

%penyederhanaan
torsi1simp= simplify(torsi1);
torsi2simp= simplify(torsi2);

cutoffup = 10^-3;
cutofflw = -10^-3;
[C1, T1] = coeffs(torsi1simp);
[C2, T2] = coeffs(torsi2simp);
C1(cutofflw<C1 & C1<cutoffup) = 0;
C2(cutofflw<C2 & C2<cutoffup) = 0;
torsi1fixed = sum(C1.*T1);
torsi2fixed = sum(C2.*T2);

%pembulatan
torsi1bul= vpa(torsi1fixed,3);
torsi2bul= vpa(torsi2fixed,3);

%koefftomatrix
%kdot21 artinya koeff dan variabel untuk tetadot2 di torsi 1
[kdotdot1,vdotdot1] = coeffs(torsi1bul,tetadotdot1);
[kdotdot2,vdotdot2] = coeffs(torsi2bul,tetadotdot2);

%persamaan teta
syms torsi1input torsi2input %ptetadotdot1c
ptetadotdot1= vpa((-kdotdot1(1,2)+torsi1input)/kdotdot1(1,1),3);
ptetadotdot2= vpa((-kdotdot2(1,2)+torsi2input)/kdotdot2(1,1),3);
ptetadotdot1A=vpa((-kdotdot1(1,2))/kdotdot1(1,1),3);
ptetadotdot2A=vpa((-kdotdot2(1,2))/kdotdot2(1,1),3);

%substitusi tetadotdot coba
pstatetadotdot1 = subs(ptetadotdot1,sym('tetadotdot2'),ptetadotdot2);

```

```
pstetadotdot2 = subs(ptetadotdot2,sym('tetadotdot1'),ptetadotdot1);
pstetadotdot1A = subs(ptetadotdot1A,sym('tetadotdot2'),ptetadotdot2A);
pstetadotdot2A = subs(ptetadotdot2A,sym('tetadotdot1'),ptetadotdot1A);
```

**%penentuan numerator denominator**

```
pertetadotdot1 = tetadotdot1 == pstetadotdot1;
pertetadotdot2 = tetadotdot2 == pstetadotdot2;
pertetadotdot1A = tetadotdot1 == pstetadotdot1A;
pertetadotdot2A = tetadotdot2 == pstetadotdot2A;
```

**%solve persamaan teta**

```
% pssstetadotdot2 = (kodotdot2(1,2)/(d1-kodotdot2(1,1)));
psstetadotdot1 = solve(pertetadotdot1, tetadotdot1);
psstetadotdot2 = solve(pertetadotdot2, tetadotdot2);
% pssstetadotdot2 =
psstetadotdot1A = solve(pertetadotdot1A, tetadotdot1);
psstetadotdot2A = solve(pertetadotdot2A, tetadotdot2);
```

**%ganti nama variable**

```
syms x1 x2 x3 x4 dx1 dx2 dx3 dx4 u1 u2
u = [u1;u2];
y = [x1,x3];
pdx2 = subs(psstetadotdot1,
[sym('teta1'),sym('tetadot1'),sym('tetadotdot1'),sym('teta2'),sym('tetadot2'),sym('tetadotdot2'),sym('torsi1input'),sym('torsi2input')],[sym('x1'),sym('x2'),sym('dx2'),sym('x3'),sym('x4'),sym('dx4'),sym('u1'),sym('u2')]]);
pdx4 = subs(psstetadotdot2,
[sym('teta1'),sym('tetadot1'),sym('tetadotdot1'),sym('teta2'),sym('tetadot2'),sym('tetadotdot2'),sym('torsi1input'),sym('torsi2input')],[sym('x1'),sym('x2'),sym('dx2'),sym('x3'),sym('x4'),sym('dx4'),sym('u2'),sym('u1')]]);
pdx2A = subs(psstetadotdot1A,
[sym('teta1'),sym('tetadot1'),sym('tetadotdot1'),sym('teta2'),sym('tetadot2'),sym('tetadotdot2'),sym('torsi1input'),sym('torsi2input')],[sym('x1'),sym('x2'),sym('dx2'),sym('x3'),sym('x4'),sym('dx4'),sym('u1'),sym('u2')]]);
pdx4A = subs(psstetadotdot2A,
[sym('teta1'),sym('tetadot1'),sym('tetadotdot1'),sym('teta2'),sym('tetadot2'),sym('tetadotdot2'),sym('torsi1input'),sym('torsi2input')],[sym('x1'),sym('x2'),sym('dx2'),sym('x3'),sym('x4'),sym('dx4'),sym('u2'),sym('u1')]]);
```

**%nominal points untuk x2 x4**

```
pdx2 = vpa(subs(pdx2, [sym('x2'),sym('x4')],[0,0]),3);
pdx4 = vpa(subs(pdx4, [sym('x2'),sym('x4')],[0,0]),3);
pdx2A = vpa(subs(pdx2A, [sym('x2'),sym('x4')],[0,0]),3);
pdx4A = vpa(subs(pdx4A, [sym('x2'),sym('x4')],[0,0]),3);
```

```

%fungsi non-linear
dx1 = x2;
dx2 = pdx2;
dx3= x4;
dx4 = pdx4;
%fungsi non-linear A
dx1A = x2;
dx2A = pdx2A;
dx3A= x4;
dx4A = pdx4A;

%jacobian
Al= vpa(jacobian([dx1,dx2A,dx3,dx4A],[x1,x2,x3,x4]),3);
Bl= vpa(jacobian([dx1,dx2,dx3,dx4],[u1,u2]),3);
Cl= vpa(jacobian(y,[x1,x2,x3,x4]),3);
Dl= vpa(jacobian(y,[u1,u2]),3);

%MOTOR
Km = 1000;
L = 100;
R = 10;

```

## C.2 Kode untuk Keterkendalian dan Keteramatan Sistem

```

%CONTROLLABILITY&OBSERVABILITY
clear;
clc;

“file utama.m”;

g1 = [0;5.0e1*u1/(4.59e1*cos(2.0*x3) - 1.75*sin(2.0*x3) + 5.14e1*cos(x3) +
1.23*cos(x3)*sin(x3) - 1.76e1*sin(x3)^2 + 2.7e1);0;-
(0.0247*u1*cos(x3))/(0.918*cos(2.0*x3) - 0.035*sin(2.0*x3) + 1.03*cos(x3) + 0.541)
+ (0.353*u1*sin(x3))/(0.918*cos(2.0*x3) - 0.035*sin(2.0*x3) + 1.03*cos(x3) +
0.541)/((0.0247*cos(x3)*sin(x3))/(0.918*cos(2.0*x3) - 0.035*sin(2.0*x3) +
1.03*cos(x3) + 0.541) - (0.353*sin(x3)^2)/(0.918*cos(2.0*x3) - 0.035*sin(2.0*x3) +
1.03*cos(x3) + 0.541) + 1.0)];
g2 = [0;1.76e1*u2*sin(x3)/(4.59e1*cos(2.0*x3) - 1.75*sin(2.0*x3) + 5.14e1*cos(x3) +
1.23*cos(x3)*sin(x3) - 1.76e1*sin(x3)^2 +
2.7e1);0;0.353*u2/((0.0247*cos(x3)*sin(x3))/(0.918*cos(2.0*x3) - 0.035*sin(2.0*x3)
+ 1.03*cos(x3) + 0.541) - (0.353*sin(x3)^2)/(0.918*cos(2.0*x3) - 0.035*sin(2.0*x3) +
1.03*cos(x3) + 0.541) + 1.0)];

```

```

f = [x2;9.11e2*cos(x3)*sin(x3)/(4.59e1*cos(2.0*x3) - 1.75e1*sin(2.0*x3) +
5.14e1*cos(x3) + 1.23*cos(x3)*sin(x3) - 1.76e1*sin(x3)^2 +
2.7e1);x4;(18.2*cos(x3)/((0.0247*cos(x3)*sin(x3))/(0.918*cos(2.0*x3) -
0.035*sin(2.0*x3) + 1.03*cos(x3) + 0.541) - (0.353*sin(x3)^2)/(0.918*cos(2.0*x3) -
0.035*sin(2.0*x3) + 1.03*cos(x3) + 0.541) + 1.0))];
n=1;
x = [x1,x2,x3,x4];

lieg1= liebracket(f,g1,x,n);
lieg2= liebracket(f,g2,x,n);
C = [g1,g2,lieg1,lieg2];
rank(C)

%observability x1
xobs1=[x1,x3];
G1 = [x1;f(1);f(2)];
dG1 = jacobian(G1,xobs1);
rank(dG1)

%observability x2
xobs2=[x2,x4];
G2 = [x2;f(3);f(4)];
dG2 = jacobian(G2,xobs2);
rank(dG2)

```

### C.3 Kode untuk Fungsi Lie Bracket

```

function ad_fng = liebracket(f,g,x,n)
% LIEBRACKET (Nth order iterated Lie bracket of f and g)
%
% Usage:
% ad_fng = liebracket(f,g,x,n)
%
% Input:
% f = symbolic vector field of length l1 (first operand)
% g = symbolic vector field of length l1 (second operand)
% x = symbolic vector of variables
% n = order of the Lie Bracket
%
% Output:
% ad_fng = [ g [f,g] [f,[f,g]] [f,[f,[f,g]]] .... ]
%      n= 0   1   2   3
%      g  adf_g adf2_g adf3_g
%

```

```

%
% Note: define the symbolic variables as
%   x1=sym(x1,'real')
%   in order to get rid of the conjugates
%   (only if they are reals).
%
% Author: Atakan Varol
% Date: 03.23.2006
ad_fng = sym(zeros(length(f),n+1));
ad_fng(:,1) = g;

if n>0
    for t = 2:n+1
        ad_fng(:,t) = jacobian(ad_fng(:,t-1),x)*f - jacobian(f,x)*ad_fng(:,t-1);
    end
end
ad_fng = expand(ad_fng);

% End of code

```

## C.4 Kode untuk Pengujian Kestabilan Lyapunov

```

%LYAPUNOV
clear;
clc;

new24april2017v2;

syms kp1 kp2 kd1 kd2 t torsi1 torsi2;

%pembulatan
cutoffup = 10^-3;
cutofflw = -10^-3;
[C1, T1] = coeffs(M(1,1));
[C2, T2] = coeffs(M(1,2));
[C3, T3] = coeffs(M(2,1));
[C4, T4] = coeffs(M(2,2));
C1(cutofflw<C1 & C1<cutoffup) = 0;
C2(cutofflw<C2 & C2<cutoffup) = 0;
C3(cutofflw<C3 & C3<cutoffup) = 0;
C4(cutofflw<C4 & C4<cutoffup) = 0;
Mbul(1,1) = sum(C1.*T1);
Mbul(1,2) = sum(C2.*T2);
Mbul(2,1) = sum(C3.*T3);

```



```

Mbul(2,2) = sum(C4.*T4);

teta = [teta1;teta2];
tteta = transpose(teta);
tetadot = [tetadot1 ; tetadot2];
ttetadot = transpose(tetadot);
Kp = [kp1 0; 0 kp2];
Kd = [kd1 0; 0 kd2];
u = [torsi1;torsi2];
g = [G1;G2];

V = vpa(0.5*((ttetadot*Mbul*tetadot)+(tteta*Kp*teta)),3)
Vf = subs(V,[teta1,teta2,tetadot1,tetadot2,kp1,kp2],[sym(-100,'d'),sym(-100,'d'),sym(-100,'d'),sym(-100,'d'),sym(10,'d'),sym(10,'d')])
[~,p] = chol(V);

Vdot = vpa(ttetadot*(u-g-Kp*tetadot),3)
Vdotf = subs(Vdot,[teta1,teta2,tetadot1,tetadot2,kp1,kp2,torsi1,torsi2],[sym(-100,'d'),sym(-100,'d'),sym(-100,'d'),sym(-100,'d'),sym(-100,'d'),sym(10,'d'),sym(10,'d'),sym(600,'d'),sym(600,'d')])

```

*“Halaman ini sengaja dikosongkan”*

## LAMPIRAN D

### SPESIFIKASI MOTOR REXROTH MAD100B

Penelitian ini mengasumsikan menggunakan motor Rexroth MAD100B. Spesifikasi lengkap dari motor tersebut dapat dilihat pada gambar D.1.

| Description                                     | Symbol                 | Unit              | MAD100B   |      |                              |                     |      |
|---|------------------------|-------------------|---|------|------------------------------|---------------------|------|
| <b>Motor data <sup>1)</sup></b>                 |                        |                   |   |      |                              |                     |      |
| Winding   |                        |                   | 0050  | 0100 | 0150                         | 0200                | 0250 |
| Rated torque                                    | M <sub>rated</sub>     | Nm                | 34  | 31   | 28                           | 28                  | 25   |
| Rated speed                                     | n <sub>rated</sub>     | rpm               | 500   | 1000 | 1500                         | 2000                | 2500 |
| Rated power                                     | P <sub>rated</sub>     | kW                | 1.8   | 3.2  | 4.4                          | 5.9                 | 6.5  |
| Rated current                                   | I <sub>rated</sub>     | A                 | 5.3   | 8.9  | 11.8                         | 14.6                | 16.2 |
| Continuous torque at standstill                 | M <sub>ct</sub>        | Nm                | -   | 34   | 31                           | 30                  | 28   |
| Derating speed                                  | n <sub>1</sub>         | rpm               | -   | 500  | 1000                         | 1500                | 2000 |
| Continuous current at standstill                | I <sub>ct</sub>        | A                 | -   | 9.4  | 12.5                         | 15.3                | 16.8 |
| Maximum speed                                   | M <sub>max</sub>       | Nm                | 75  | 75   | 68                           | 66                  | 62   |
| Torque constant at 20°C                         | K <sub>GL, rated</sub> | Nm/A              | 7.66  | 4.31 | 3.03                         | 2.41                | 2.11 |
| Number of pole pairs                            | p                      |                   | 3   |      |                              |                     |      |
| Min. cross section of power cable <sup>2)</sup> | A                      | mm <sup>2</sup>   | 2.5   |      |                              |                     |      |
| Rotor moment of inertia <sup>3)</sup>           | J <sub>rot</sub>       | kgm <sup>2</sup>  | 0.019   |      |                              |                     |      |
| Mass of motor <sup>4)</sup>                     | m                      | kg                | 39  |      |                              |                     |      |
| - Standard                                      | n <sub>max</sub>       | rpm               | 3000  | 6000 | 9000                         |                     |      |
| Maximum speed with coupling attachment          | n <sub>max</sub>       | rpm               | 3000  | 6000 | 6300                         |                     |      |
| - reinforced                                    | n <sub>max</sub>       | rpm               | not available   |      |                              |                     |      |
| - High-speed                                    | n <sub>max</sub>       | rpm               | 3000  | 6000 | 9000                         | 11000 <sup>7)</sup> |      |
| Thermal time constant                           | T <sub>th</sub>        | min               | 30  |      |                              |                     |      |
| Duty cycle time (S6-44%)                        | T <sub>c</sub>         | min               | i.p.  |      |                              |                     |      |
| Noise level <sup>5)</sup>                       | P <sub>sound</sub>     | dB(A)             | 70 (+3)   |      |                              |                     |      |
| Permissible ambient temperature                 | T <sub>um</sub>        | °C                | 0...+40   |      |                              |                     |      |
| Permissible storage and transport temperature   | T <sub>lager</sub>     | °C                | -20...+80   |      |                              |                     |      |
| Insulation class according to DIN VDE 0530-1    |                        |                   | F   |      |                              |                     |      |
| International Protection class                  |                        |                   | IP65  |      |                              |                     |      |
| <b>Holding brake (optional)</b>                 |                        |                   | <b>Electrically-clamped</b>                             |      | <b>Electrically-released</b> |                     |      |
| Transmittable torque                            | M <sub>h</sub>         | Nm                | 30  |      | 24                           |                     |      |
| Connection voltage                              | U <sub>br</sub>        | V                 | DC 24 ± 10 %  |      |                              |                     |      |
| Rated current                                   | I <sub>br</sub>        | A                 | 0.9   |      | 1.1                          |                     |      |
| Moment of inertia                               | J <sub>br</sub>        | kgm <sup>2</sup>  |   |      | 0.00056                      |                     |      |
| Max. permissible braking energy                 | W <sub>brp</sub>       | Ws                |   |      | 20000                        |                     |      |
| Disengagement time                              | t <sub>2</sub>         | ms                | 50  |      | 90                           |                     |      |
| Engagement time                                 | t <sub>1</sub>         | ms                | 42  |      | 30                           |                     |      |
| Maximum speed of brake                          | n <sub>br, max</sub>   | rpm               | 10000   |      | 10000                        |                     |      |
| Mass of brake                                   | m                      | kg                | 2   |      | 1.6                          |                     |      |
| <b>Blower</b>                                   |                        |                   | <b>Axial blower</b>                                     |      |                              |                     |      |
| Air current                                     |                        |                   | B → A, blowing  |      |                              |                     |      |
| Connection voltage                              | U <sub>bl</sub>        | V                 | 3 x 400V ± 15 %, 50/60 Hz ... 3 x 480V ± 10 %, 50/60 Hz |      |                              |                     |      |
| Power consumption                               | S <sub>bl</sub>        | VA                | 83 ... 100  |      |                              |                     |      |
| Blower current <sup>6)</sup>                    | I <sub>bl</sub>        | A                 | 0.12  |      |                              |                     |      |
| Average air flowrate                            | V                      | m <sup>3</sup> /h | 230   |      |                              |                     |      |

<sup>1)</sup> Values determined according to IEC 60034-1. Current and voltage specified as root-mean-square values.  
<sup>2)</sup> Rated for cable assemblies with current carrying capacity according to VDE0298-4 (1992) and installation type B2 according to EN 60204-1 (1993) at 40°C ambient temperature.  
<sup>3)</sup> Values without holding brake.  
<sup>4)</sup> Values without holding brake, with blower.  
<sup>5)</sup> At 1m distance, with PWM = 4 kHz.  
<sup>6)</sup> From I<sub>n</sub> + 20%, blowers should be monitored.  
<sup>7)</sup> Value is without a holding brake. This value may be limited by a holding brake.

Gambar D.1 Spesifikasi motor Rexroth MAD100B  
(www.boschrexroth.com)

***“Halaman ini sengaja dikosongkan”***

## BIODATA PENULIS



**Bill Febrian Winoto**  
dilahirkan di Surabaya pada 3 Februari 1995. Penulis merupakan anak pertama dari Eddy Winoto dan Kartikawati Hendranata. Penulis memulai pendidikan dari TK Buah Hati Surabaya, SD Cita Hati Surabaya, SMP Petra 3 Surabaya, SMA Petra 2 Surabaya, dan melanjutkan studi di Jurusan Teknik Mesin Institut Teknologi Sepuluh Nopember (ITS) Surabaya dengan nomor induk 2113100064.

Penulis aktif dalam berbagai kegiatan akademik dan non-akademik selama masa perkuliahan. Penulis juga merupakan mahasiswa pertukaran pelajar selama 1 semester di Hochschule Darmstadt, Jerman. Penulis dapat dihubungi melalui alamat email [billfebrianw@gmail.com](mailto:billfebrianw@gmail.com).